

Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Diseño y gestión de infraestructuras de CPD sostenible: Un enfoque verde

Máster Universitario en Dirección TIC para la Defensa

ALUMNO:	Mariano Migallón Pacheco
DIRECTORES:	Fernando Suárez Lorenzo Francisco Manuel Troncoso Pastoriza
CURSO ACADÉMICO:	2024-2025

Universidad de Vigo



Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Diseño y gestión de infraestructuras de CPD sostenible: Un enfoque verde

Máster Universitario en Dirección TIC para la Defensa

Especialidad de Sistemas y Tecnologías de la Información

Universidade Vigo

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Máster (TFM) analiza cómo diseñar y gestionar Centros de Procesamiento de Datos (CPD) sostenibles, enfocándose en la reducción del impacto ambiental y la eficiencia energética. Este estudio excluye la configuración de equipos de Tecnologías de la Información (TI) para centrarse en la infraestructura, evaluando prácticas sostenibles, normativas, certificaciones y el balance entre costos y beneficios.

Los objetivos específicos incluyen reducir el consumo energético mediante tecnologías eficientes y energías renovables, optimizar sistemas de refrigeración con técnicas como enfriamiento adiabático y *free cooling*, y minimizar la huella de carbono adoptando energías limpias y operaciones sostenibles. Además, se fomenta la reutilización de recursos, como agua y energía residual, alineándose con principios de economía circular.

Las normativas y certificaciones verdes, son tenidas en cuenta en este trabajo, éstas fomentan la sostenibilidad en los CPD, reduciendo su impacto ambiental, mejorando la eficiencia energética y minimizando emisiones de carbono. También evalúan la sostenibilidad en la construcción y miden la eficiencia energética mediante métricas como el PUE[1].

La importancia de los CPD sostenibles radica en mitigar el creciente consumo energético global y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos centros apoyan los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)[2], como energía limpia y acción climática, abordando desafíos ambientales como el uso excesivo de agua para refrigeración. Entre las ventajas destacan la eficiencia operativa, la reducción de costos y el cumplimiento normativo, elementos que no solo protegen el medio ambiente, sino también aumentan la competitividad empresarial. Adaptar estas prácticas es clave para un futuro más sostenible y eficiente en la era digital.

PALABRAS CLAVE

Centro de procesamientos de datos, energías renovables, refrigeración, PUE, eficacia del uso de energía.

[1] *PUE: Power Usage Effectiveness.* Es el indicador más utilizado a nivel global para evaluar la eficiencia energética de un CPD.

[2] Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son medidas adoptadas por los líderes mundiales para proteger el planeta, luchar contra la pobreza y tratar de erradicarla con el objetivo de construir un mundo más próspero, justo y sostenible para las generaciones futuras. Estos objetivos se fijaron dentro de la Agenda 2030 sobre el desarrollo sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi agradecimiento a aquellas personas que han sido fundamentales durante la realización de este trabajo.

A mi esposa, Irene, por su paciencia y apoyo en todo momento. Sin su comprensión y ánimo, este camino habría sido mucho más difícil. A mis hijos, quienes con su alegría y cariño me recordaron día a día la importancia de seguir adelante, incluso en los momentos más desafiantes.

A mis compañeros de este Máster, de todos he aprendido algo, y me llevo un muy buen recuerdo para el futuro.

También quiero agradecer especialmente a mis tutores, Fernando y Francisco Manuel, por su guía, sus valiosas sugerencias y su dedicación. Su orientación ha sido muy importante para el desarrollo de este proyecto y me ha permitido crecer tanto a nivel académico como personal.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.

CONTENIDO

Contenido 1
Índice de Figuras 4
Índice de Tablas 5
1 Introducción y objetivos 7
1.1 Objetivo del trabajo 8
1.2 Justificación e importancia de los CPD sostenibles 8
1.3 Metodología de trabajo 9
1.4 Estructura del TFM 10
1.4.1 Introducción 10
1.4.2 2. Estado del arte 10
1.4.3 3. Principios y tecnologías sostenibles 10
1.4.4 4. Implementación y viabilidad 11
1.4.5 5. Conclusiones y recomendaciones 11
2 Estado del Arte 13
2.1 CPD 13
2.1.1 Funcionamiento de un CPD 13
2.1.1 Evolución de los CPD 14
2.1.2 Tipología y arquitectura de los CPD 16
2.1.3 Clasificación de los CPD según los niveles Tier 17
2.1.4 Arquitecturas y diseños comunes en los CPD 19
2.2 CPD sostenibles 20
2.2.1 Green data center 21
2.2.2 Diferencias entre un data center y un green data center 21
2.2.3 Condiciones para que un data center sea verde 21
2.2.4 Ventajas de los green data center 22
2.2.5 Problemas de los centros de datos verdes 23
2.3 Principios de gestión y diseño de infraestructuras sostenibles 23
2.3.1 Eficiencia energética 23
2.3.2 Diseño modular 24
2.3.3 Refrigeración eficiente 24
2.3.4 Uso de energías renovables 25
2.3.5 Gestión sostenible del agua 25

2.3.6 Reciclaje de calor residual 26
2.4 Normativas y certificaciones 26
2.4.1 ISO 50001: Sistema de Gestión de la Energía (SGE) 27
2.4.2 AENOR EA 004:2013 30
2.4.3 LEED 33
2.4.4 BREEAM 35
2.5 Aplicación de métricas para CPD 37
2.5.1 Objetivo 37
2.5.2 Métricas utilizadas 38
3 Implementaciones a realizar en CPD sostenible 43
3.1 Eficiencia energética 43
3.1.1 Consumo energético 43
3.1.2 Indicadores clave de eficiencia energética (PUE, WUE, DCiE) 44
3.1.3 Estrategias de optimización energética 46
3.1.4 Sistemas de refrigeración tradicionales 46
3.1.5 Optimización de los sistemas de climatización sostenibles HVAC 50
3.1.6 Nuevas tecnologías para la reducción del consumo energético 52
3.2 Diseño de las infraestructuras 52
3.2.1 Materiales y construcción ccológica 52
3.2.2 Ubicación y entorno del CPD 54
3.3 Gestión del ciclo de vida de un CPD 56
3.3.1 Diseño para la sostenibilidad desde el inicio hasta el desmantelamiento 56
3.3.2 Gestión de residuos y reciclaje de componentes electrónicos 56
3.3.3 Estrategias de prolongación de la vida útil de los equipos 57
3.3.4 Políticas de economía circular aplicadas a los CPD 57
3.3.5 Implementaciones de CPD sostenibles 58
4 Resultados 59
4.1 CPD tradicional vs sostenible 59
4.1.1 Costos 59
4.1.2 Beneficios 60
4.2 Análisis DAFO 61
5 Análisis de viabilidad del CPD sostenible 63
5.1 Contexto y justificación del CPD sostenible 63
5.2 Costos iniciales y de infraestructura 63
5.3 Costos operativos y ahorros en energía 63

5.4 Impacto ambiental 64
5.5 Retorno de inversión (ROI) 64
5.6 Análisis de viabilidad 64
6 Líneas Futuras 67
6.1 Innovaciones tecnológicas 67
6.1.1 Energías renovables y almacenamiento de energía 67
6.1.2 Inteligencia artificial para la optimización energética 67
6.1.3 Plan Nacional de algoritmos verdes 69
6.2 Tendencias Futuras: Computación cuántica y Edge Computing 70
6.2.1 Computación cuántica 70
6.2.2 Edge Computing 72
7 Conclusiones 75
7.1 Conclusiones 75
7.2 Perspectivas Futuras 76
8 Bibliografía 77
Glosario de términos y abreviaturas 81
Anexo I: Comparativa LEED vs BREEAM 83
Anexo II: Métricas de sostenibilidad para aplicar en un CPD 85
Anexo III: Iniciativas recientes en CPD sostenbles 86
Anexo IV: Análisis DAFO 88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Esquema básico de la infraestructura de un CPD (Fuente: Empresa Nabiax 2023) [3] .15
Figura 2-2 Clasificación TIER (Fuente: Empresa Nabiax 2023) [4] 17
Figura 2-3 CPD modular (Fuente: SME Soluciones 2024) [5] 19
Figura 2-4 Edge Computing vs Cloud computing (Fuente: DIGI Internacional 2024) [6].....20
Figura 2-5 CPD con placas solares y renovables (Fuente: Data Center Market 2024) [7] 21
Figura 3-1 Refrigeración tradicional (Fuente: Prointer. Climatización y energía) [24].....47
Figura 3-2 Refrigeración líquida indirecta (Fuente: Prointer. Climatización y energía) [24].....48
Figura 3-3 Free cooling para CPD (Fuente: Empresa AERMEC) [25].....50
Figura 3-4 CPD de Telefónica en Alcalá de Henares (Fuente: Telefónica empresas 2024) [30] 55
Figura 3-5 Índice de riesgos de catástrofes por fenómenos naturales (Fuente: Statista 2024) [31].56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Clasificación de los niveles TIER en los CPD [4] 19
Tabla 2-2: Consumo energético con diferentes tecnologías de refrigeración [10] 25
Tabla 2-3 Elementos clave de ISO 14001 para CPD (Fuente: ISO 14001, 2020) [12] 29
Tabla 3-1. Comparación de los diferentes sistemas de refrigeración [23] 49
Tabla 3-2. Costo según tipo de refrigeración en CPD [23] 49
Tabla 3-3. Potencial de ahorro energético con sistemas de free cooling en diferentes climas [21] 50
Tabla 3-4. Comparativa de consumo energético [20] 51
Tabla 3-5. Comparación entre un sistema de HVAC [26] 51
Tabla 3-6. Ahorro energético potencial al implementar free cooling en diferentes climas [21] 54
Tabla 4-1. Comparación de costos iniciales entre CPD convencional y CPD verde [34] 59
Tabla 4-2. Comparación de costos operativos anuales [35] 60
Tabla 4-3. Reducción de consumo energético en CPD verdes [36] 60
Tabla 4-4. Estimación del Retorno de la Inversión en CPD Verde [35] 61
Tabla 5-1: Comparativa de Costos Iniciales y de Infraestructura [38] [39] [40] 64
Tabla 5-2: Comparativa de Ahorros Operativos y Emisiones de CO_2 [41] 64
Tabla 6-1. Comparativa tipos de baterías (Fuente: elaboración propia) 67
Tabla 6-2. Impacto de la IA en consumo energético de los CPD [43] 69
Tabla 6-3: Aplicación computación cuántica. Ventajas y desventajas [45] [46] [47] 72
Tabla 6-4: Aplicación Edge Computing. Ventajas y desventajas [48] [49] [50] 73
Tabla A1-1. Cuadro comparativo LEED vs BREEAM (Fuente: elaboración propia) 83
Tabla A2-1. Métricas de sostenibilidad a utilizar en un CPD [12] 85
Tabla A4-1. Análisis interno DAFO (Fuente: elaboración propia) 89
Tabla A4-2. Análisis externo DAFO (Fuente: elaboración propia) 91

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La información y los datos han adquirido un papel primordial en la sociedad contemporánea, constituyendo la base para la toma de decisiones, el desarrollo de tecnologías y la generación de conocimiento. En un mundo cada vez más digitalizado, la capacidad de procesar, almacenar y analizar grandes volúmenes de datos se ha convertido en una prioridad estratégica para empresas, gobiernos y organizaciones de todo tipo. Por ello, invertir en centros de procesamiento de datos (CPD) con gran capacidad de almacenamiento resulta indispensable para garantizar el acceso y la disponibilidad de la información.

Sin embargo, estos centros de datos, fundamentales para el funcionamiento de la economía digital, enfrentan un importante desafío: su elevado consumo energético. Los CPD actuales no solo demandan grandes cantidades de energía para su operación, sino que también generan un impacto significativo en el medioambiente, contribuyendo a la emisión de gases de efecto invernadero y al agotamiento de recursos naturales. Esta situación pone de manifiesto la necesidad de repensar los modelos tradicionales de infraestructura tecnológica.

En este contexto, la transición hacia centros de procesamiento de datos ecológicos representa una alternativa sostenible. Estos centros, diseñados para minimizar su impacto ambiental, priorizan el uso de energías renovables como la solar, eólica o hidráulica, y emplean tecnologías avanzadas para mejorar la eficiencia energética. Invertir en estas soluciones no solo permite mitigar el daño al medioambiente, sino que también responde a la creciente demanda de responsabilidad social y sostenibilidad en el ámbito tecnológico. Este enfoque es esencial para garantizar un equilibrio entre el desarrollo digital y la protección del entorno natural.

Se estima que según la Agencia Internacional de Energía (AIE) [1], los CPD consumen aproximadamente el 1% de la electricidad mundial y el 5% de la electricidad de Europa. La huella de carbono sigue aumentando debido a la creciente demanda de los servicios digitales. Se estima que aproximadamente el 40% de la electricidad es consumida por los sistemas de refrigeración en un centro de datos.

Actualmente, los CPD tradicionales presentan varias limitaciones derivadas de su diseño, como el alto consumo energético, la generación excesiva de calor, la dependencia de sistemas de enfriamiento ineficientes y el uso de fuentes de energía no renovables. Estas características no solo los convierten en sistemas obsoletos, sino también en estructuras que implican altos costos operativos, un impacto ambiental significativo y una falta de adaptabilidad a las necesidades modernas.

Frente a este panorama, la transición hacia centros de datos sostenibles basados en energías renovables se presenta como una alternativa viable. Estos CPD sostenibles, diseñados para optimizar el

consumo energético y reducir las emisiones de carbono, no solo se alinean con los objetivos globales de sostenibilidad, sino que también ofrecen ventajas operativas, como una mayor eficiencia y escalabilidad.

1.1 Objetivo del trabajo

El propósito de este TFM es realizar un análisis exhaustivo de los diversos factores que inciden en el diseño y la gestión de un CPD sostenible. No se plantea el diseño específico de un CPD en particular, sino un estudio pormenorizado de los elementos que influyen en la creación y operación de infraestructuras orientadas hacia la sostenibilidad y la eficiencia ecológica.

El presente trabajo tiene como objetivo servir como guía y referencia para la implementación de prácticas sostenibles en cualquier infraestructura de este tipo, aunque su enfoque principal radica en los centros de datos. Para ello, se parte de una revisión de los conceptos fundamentales relacionados con los CPD y se analizan las mejores prácticas en términos de eficiencia energética.

Asimismo, se propone un diseño sostenible para las infraestructuras, incorporando las normativas vigentes y las certificaciones aplicables. Se incluye una evaluación integral de los costos y beneficios asociados a la implementación de estas medidas. Además, se abordan las tecnologías de eficiencia energética y los sistemas avanzados de refrigeración, junto con estrategias de gestión y operación que permitan optimizar el rendimiento mientras se minimiza el impacto ambiental.

Cabe destacar que el estudio excluye aspectos relacionados con la configuración específica del hardware del CPD (como servidores, dispositivos de almacenamiento, redes de comunicación y sus sistemas), concentrándose en cambio en las instalaciones y los sistemas de soporte, que representan los mayores consumidores de energía. Este enfoque permite identificar mejoras potenciales que contribuyan al logro de objetivos medioambientales sostenibles. Para ello se tienen en cuenta los siguientes objetivos específicos:

- **Identificar las deficiencias de los CPD tradicionales:** realizar un análisis detallado de los inconvenientes técnicos, económicos y ambientales asociados a su operación.
- **Evaluar la eficiencia energética:** comparar el consumo energético y la sostenibilidad de los CPD tradicionales frente a las soluciones sostenibles disponibles en el mercado.
- **Explorar tecnologías innovadoras:** investigar las herramientas y metodologías que permiten la integración de energías renovables en los CPD, como sistemas de enfriamiento eficientes y almacenamiento de energía.
- **Proponer un modelo de transición:** diseñar un plan inicial para implementar centros de datos sostenibles, destacando los beneficios a corto y largo plazo.
- **Demostrar la viabilidad económica y operativa:** justificar mediante un análisis costo-beneficio cómo la inversión en sostenibilidad mejora la operatividad, reduce costos y minimiza el impacto ambiental.

Con este enfoque, el trabajo busca no solo evidenciar las limitaciones actuales, sino también proporcionar una solución pragmática y alineada con los compromisos globales de sostenibilidad y eficiencia tecnológica.

1.2 Justificación e importancia de los CPD sostenibles

El rápido crecimiento de la digitalización a nivel mundial y de la demanda de energía que trae consigo, hacen que sea cada vez más crucial construir y administrar centros de datos sostenibles. Según el informe de la Agencia Internacional de Energía (AIE) del año 2020 [1], los CPD y las redes de telecomunicaciones podrían llegar a ser responsables de hasta un 8% del consumo global de electricidad para el año 2030. Este aumento del consumo de energía está estrechamente relacionado con las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Otro impacto ambiental estaría relacionado con el uso excesivo de agua para la refrigeración.

Los centros de datos sostenibles son la clave para mitigar estos efectos. Es importante fomentar una infraestructura tecnológica que sea eficaz y cumpla con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de Naciones Unidas (ONU), como el ODS 7[3] y el ODS 13[4]

Entre los motivos que respalda la implementación de enfoque ecológico en los CPD son los siguientes:

- **Impacto ambiental**: los CPD convencionales consumen mucha energía para funcionar y enfriar los equipos, lo que provoca en un aumento de la huella de carbono.
- **Eficiencia operativa y reducción de costes:** los CPD ecológicos posibilitan a largo plazo una reducción de costos. El uso de tecnologías como el *free cooling* y las energías renovables disminuye de manera considerable el gasto de energía.
- **Regulación y normativas:** en creciente medida, gobiernos y entidades globales implementan regulaciones más estrictas sobre el uso de energía y la reducción de emisiones, lo que exige a las empresas tecnológicas adoptar prácticas sostenibles.

Es necesario invertir recursos en tecnologías y métodos sostenibles. Esto trae ventajas en términos ecológicos y también aumenta la competitividad de las empresas que administran CPD, al cumplir con regulaciones ambientales y disminuir sus gastos operativos.

1.3 Metodología de trabajo

Para llevar a cabo el presente TFM, se ha seguido una metodología de trabajo que ha combinado una investigación documental, para posteriormente realizar un análisis técnico. Esta metodología incluye las siguientes etapas:

1. **Revisión bibliográfica:** se ha realizado una investigación sobre las mejores prácticas y tecnologías de sostenibilidad aplicadas en CPD. Se han consultado informes técnicos, artículos científicos.
2. **Revisión normativa reguladora:** normativas de la Organización Internacional de Normalización (ISO) como la ISO 14001 y ISO 50001, los alineamientos del *Green Grid.*
3. **Estudio de casos empíricos:** estudios de casos reales de CPD que han logrado mejoras significativas en su sostenibilidad Se ha analizado ejemplos de CPD que ya aplican tecnologías verdes, con especial atención a aquellos que han conseguido una optimización energética y han reducido su huella de carbono.
4. **Análisis técnico:** se han analizado todos los factores que influyen para implementar un modelo de CPD verde, proponiendo mejoras tecnológicas y estrategias de operación que minimicen el impacto medioambiental. Este diseño incluirá el uso de energías renovables, soluciones de refrigeración eficientes y sistemas de gestión de energía inteligente.
5. **Análisis DAFO:** como una herramienta esencial para examinar la viabilidad de dicha transición.
6. **Análisis de viabilidad**: donde se han evaluado los costos de instalación, los ahorros operativos, la sostenibilidad a largo plazo, los beneficios medioambientales, las regulaciones gubernamentales y las posibles barreras tecnológicas.

[3] Energía asequible y no contaminante
[4] Acción por el clima

1.4 Estructura del TFM

1.4.1 Introducción

- **Contexto del problema**: impacto medioambiental debido a su alto consumo energético.
- **Justificación**: la digitalización, el *IoT*, y las tecnologías emergentes como IA y *blockchain* exigen una infraestructura sostenible que minimice la huella de carbono y maximice la eficiencia energética.
- **Objetivos**:
    - Estudiar y proponer estrategias de diseño y gestión para CPD sostenibles.
    - Evaluar el balance entre costos, beneficios.
    - Aplicación de normativas y estándares ecológicos.
    - Implementar las medidas planteadas para obtener CPD sostenibles.

1.4.2 2. Estado del arte

- **Evolución de los CPD**:
    - De infraestructuras físicas centralizadas (décadas 60-80) a soluciones híbridas y la computación en la nube (2010 en adelante).
    - Emergencia de tecnologías descentralizadas como el *edge computing*, optimizando la latencia y la gestión local de datos.
- **Concepto de CPD verde**:
    - Integración de energías renovables y sistemas de refrigeración eficientes.
    - Uso de métricas como PUE y WUE para evaluar la sostenibilidad.
    - Ventajas y desafíos: desde la reducción de costos hasta las complejidades tecnológicas y regulatorias.

1.4.3 3. Principios y tecnologías sostenibles

- **Diseño modular y escalable**:
    - Flexibilidad para adaptarse a demandas variables.
    - Reducción de desperdicios a través de módulos reutilizables.
- **Eficiencia energética**:
    - Optimización del uso energético mediante refrigeración eficiente (*free cooling*, adiabática, etc.).
    - Reutilización de calor residual en sistemas externos.
- **Gestión de recursos naturales**:
    - Implementación de sistemas de recirculación de agua y captación de aguas pluviales.
    - Energías renovables como solar y eólica.
- **Normativas y certificaciones**:
    - Estándares como ISO 50001, LEED, y AENOR EA 004 que establecen pautas de sostenibilidad.

1.4.4 4. Implementación y viabilidad

- **Comparativa CPD tradicionales vs sostenibles**:
  - Reducción de consumo energético mediante tecnologías modernas.
  - Retorno de inversión positivo, al disminuir los costos operativos.
- **Estudio de caso**: Implementación para conseguir un CPD sostenible.
  - Beneficios: Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).
  - Desafíos: Costos iniciales, requerimientos técnicos, y adaptaciones estructurales.

1.4.5 5. Conclusiones y recomendaciones

- **Conclusiones**:
  - Los CPD sostenibles son esenciales para solventar el impacto ambiental provocado por el sector digital.
  - Las inversiones iniciales se justifican por los beneficios operativos y ambientales a largo plazo.
- **Líneas Futuras**:
  - Investigar nuevas tecnologías como la computación cuántica.
  - Expandir el uso de IA para optimización energética en tiempo real.

Esta estructura cubre los aspectos más relevantes del tema, siguiendo un enfoque lógico y argumentativo que integra datos, análisis y propuestas prácticas.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 CPD

Los CPD [2] son una gran infraestructura de computación centralizada por la que se ubican y mantienen cierta cantidad de equipos especializados, entre los que podemos citar los siguientes:

- Los servidores.
- Los dispositivos de almacenamiento de datos.
- Redes de comunicación con sus sistemas de suministro eléctrico y climatización.

Los CPD administran el procesamiento, almacenamiento y distribución de grandes volúmenes de datos e información en gobiernos, instituciones y empresas.

2.1.1 Funcionamiento de un CPD

El funcionamiento del CPD se logra mediante la interacción y el funcionamiento constante de varios subsistemas que garantizan su eficiencia y disponibilidad. Este es el lugar donde se encuentran los sistemas y tecnologías necesarias para administrar y almacenar la información de una organización o empresa. Por lo tanto, para asegurarse de que esto suceda, debe funcionar correctamente, de lo contrario, el sistema no funcionará. Los elementos más importantes que forman parte de este mecanismo son los siguientes componentes y subsistemas:

1. **Servidores y equipos de red (*Hardware*)**: incluye servidores donde se procesan los datos. Pueden ser físicos o virtuales, pero, en cualquier caso, están diseñados para procesar enormes volúmenes de datos y completar operaciones complejas. Los equipos de red manejan la interconexión entre los servidores. El hardware de almacenamiento, puede ser una variedad de unidades de disco duro, HDD[5] o SSD[6], o almacenamiento avanzado, utilizando, por ejemplo, un sistema de almacenamiento en red, SAN[7].
2. **Sistemas de climatización y gestión térmica (Refrigeración).** El *hardware* informático genera mucho calor. Por lo tanto, mantener una temperatura controlada en un centro de procesamiento es decisivo para evitar fallos de hardware por sobrecalentamiento. Para hacer esto, se usan sistemas sofisticados de planificación, como aires acondicionados industriales o

[5] *HDD*: *Hard Disk Drive* (unidad de disco duro).
[6] *SSD*: *Solid State Drive* (unidad de estado sólido)
[7] *SAN: Storage Area Network,* red de alta velocidad que conecta servidores con dispositivos de almacenamiento.

CRAC[8], sistemas de circulación de aire con flujo de aire caliente y frío para dirigir el aire frío hacia los servidores y expulsar el aire caliente. Hay centros de procesamiento que utilizan tecnología de refrigeración líquida o, si el centro de procesamiento está en una climatología fría, utiliza aire exterior ambiente para refrigeración natural para reducir el consumo de energía.

3. **Sistemas eléctricos, fuentes de energía y sistemas de respaldo:** la electricidad suministrada a un CPD debe ser ininterrumpida, ya que cualquier corte en el suministro puede provocar la pérdida de datos, daños en los equipos o la detención de servicios críticos. En consecuencia, para garantizar una operación ininterrumpida, los CPD están equipados con fuentes de energía y sistemas redundantes de respaldo de energía que incluyen:

    - Unidades de potencia ininterrumpida (UPS): suministran energía a los equipamientos durante cortos cortes o hasta que fuentes de energía de emergencia adicionales estén operativas.
    - Generadores de respaldo: suministran energía durante los cortes prolongados de energía, garantizando el suministro eléctrico durante varias horas o incluso días.
    - Fuentes de energía redundantes: los sistemas críticos están conectados a múltiples fuentes de alimentación para minimizar el riesgo de fallos.

4. **Sistemas de seguridad, protección física y ciberseguridad:** los CPD almacenan, procesan y transmiten datos sensibles y críticos, por lo que la seguridad es crucial:

    - Seguridad física: los CPD están localizados en edificios con estrictos controles de acceso que requieren el uso de credenciales, escaneo biométrico, cámaras de grabación y monitoreo 24/7. Los sistemas de barreras físicas también impiden el acceso no autorizado.
    - Ciberseguridad: los CPD están equipados con sistemas y herramientas de seguridad de información para proteger los datos. Esto incluye software de firewall, software antimalware, sistemas de detección de intrusiones (IDS) / sistemas de prevención de intrusiones (IPS) y cifrado de datos. Las copias de seguridad y el plan de recuperación de desastres, aseguran que los datos puedan ser recuperados en caso de un ataque o fallo del sistema.

5. **Sistemas de gestión y monitoreo:** para garantizar que todas las operaciones que ocurren dentro del CPD se desarrollen de manera estable, resulta fundamental tener sistemas que monitoreen constantemente el estado en que se encuentran los distintos subsistemas, como son la temperatura, la carga de trabajo de los servidores, el uso de energía y las posibles amenazas de seguridad. Ante cualquier anomalía, estos sistemas alertan al personal correspondiente, permitiendo que se intervenga de manera rápida y se resuelvan de inmediato los problemas, antes de que impacten el rendimiento o causen interrupciones facilitando que los datos puedan ser recuperados en caso de un ataque.

Como se referencia en la figura 2-1, se representa el esquema básico de infraestructuas de un CPD con los diferentes sistemas más importantes.

2.1.1 Evolución de los CPD

La evolución de los CPD ha estado marcada por cambios tecnológicos, económicos y operativos que han transformado su diseño, funcionalidad y propósito. A continuación, se detalla esta evolución.

[8] *CRAC: Computer Room Air Conditioners.* Es un sistema de aire acondicionado especializado diseñado para regular la temperatura, la humedad y la calidad del aire dentro de las salas de computadoras. A diferencia de los aires acondicionados regulares, éstas están adaptadas a los requisitos específicos de los centros de datos

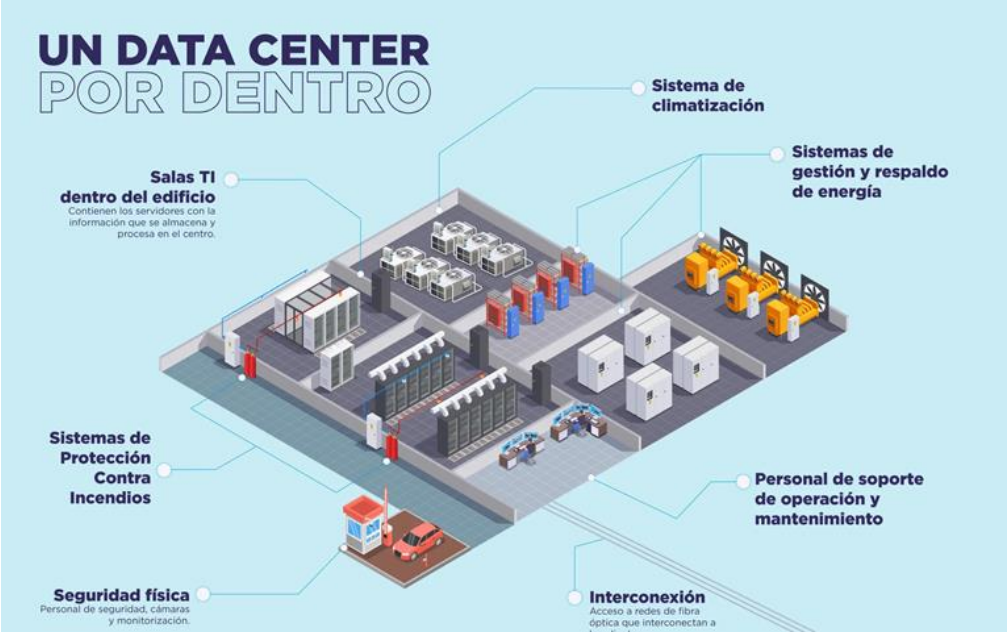


Figura 2-1 Esquema básico de la infraestructura de un CPD (Fuente: Empresa Nabiax 2023) [3]

2.1.1.1 CPD tradicionales: centralización y equipos físicos (décadas de 1960-1980)

Características:

- Utilizaban *mainframes* para tareas críticas como procesamiento de datos contables, financieros y científicos.
- Los datos eran almacenados en dispositivos magnéticos como discos duros o cintas.
- Su ubicación solía estar dentro de las instalaciones de las empresas.

Limitaciones:

- Alta dependencia de grandes infraestructuras físicas.
- Elevados costos de instalación y mantenimiento.
- Baja flexibilidad y poca capacidad de adaptación a cambios rápidos.

2.1.1.2 Virtualización y servidores distribuidos (décadas de 1990-2000)

Avances clave:

- Virtualización de servidores. Consolidación de múltiples sistemas en un solo *hardware* físico mediante *software* de virtualización.
- Uso de *clusters* y sistemas distribuidos para mejorar la capacidad de procesamiento.
- Mejora en el diseño de redes y almacenamiento.

Ventajas:

- Reducción del espacio físico necesario y aumento de la eficiencia energética.
- Mejora de la escalabilidad y capacidad de gestionar cargas dinámicas.

Desafíos:

- Mayor complejidad en la administración.
- Aumento de las necesidades de seguridad y redundancia.

2.1.1.3 Adopción de la nube y modelos híbridos (década de 2010)

La llegada de servicios de computación en la nube (Amazon *Web Services*, *Microsoft Azure*, *Google Cloud*) revolucionó la forma en que se consumen los recursos de los CPD.

Características:

- Infraestructura virtual gestionada por terceros *(cloud computing).*
- Modelos de centros de datos híbridos, combinando infraestructuras locales y servicios en la nube.
- Pago por uso, reduciendo los costos iniciales de inversión.

Beneficios:

- Escalabilidad y elasticidad inmediatas.
- Mayor enfoque en la agilidad del negocio en lugar de la gestión de infraestructura.

Retos:

- Necesidad de gestionar datos entre múltiples entornos (local, nube, y colocación).
- Preocupaciones sobre privacidad y cumplimiento normativo.

2.1.1.4 Automatización e inteligencia artificial (2020 en adelante)

Innovaciones recientes:

- Implementación *de IA y machine learning* para optimizar la gestión de los centros.
- Automatización de procesos como la monitorización de rendimiento, gestión de fallos y balanceo de cargas.
- Introducción de *infraestructura como código (IaC)* para configurar y gestionar recursos de manera automática.

2.1.1.5 Centros de datos EDGE (procesamiento en el borde):

Infraestructuras más pequeñas y descentralizadas, ubicadas cerca del punto donde se generan los datos.

Motivación:

Responder a la creciente demanda de baja latencia en aplicaciones como *IoT*, vehículos autónomos, realidad aumentada y 5G.

Ventajas:

- Reducción de la latencia y del tráfico hacia grandes CPD centrales.
- Mejor capacidad para manejar datos en tiempo real.

2.1.2 Tipología y arquitectura de los CPD

La tipología y arquitectura de CPD variarán considerablemente en función del uso operativo, el tamaño, la capacidad de almacenamiento y procesamiento, y el nivel de redundancia y disponibilidad. Por este motivo, existen diferentes niveles de exigencia y requerimientos de continuidad de los servicios en los que puedan categorizarse los distintos CPD. La clasificación de los Tiers de CPD, según *Uptime Institute* [4] es la más extendida y establece una escala de 4 niveles basados en el grado de redundancia de los sistemas y la posibilidad de mantener las operaciones en caso de fallo o mantenimiento.

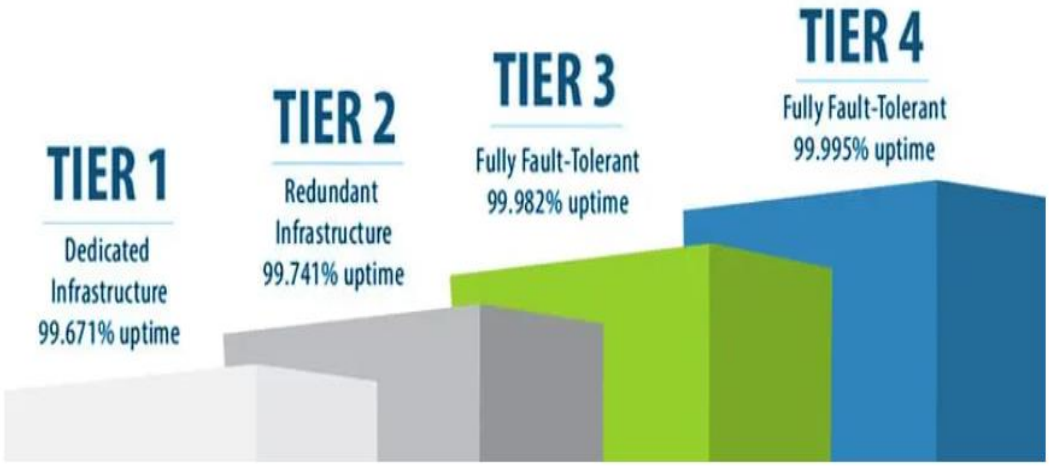


Figura 2-2 Clasificación TIER (Fuente: Empresa Nabiax 2023) [4]

2.1.3 Clasificación de los CPD según los niveles Tier

2.1.3.1 Tier I: Infraestructura básica

- Descripción: este nivel es el más bajo y proporciona la infraestructura básica para ejecutar un CPD. Un centro de datos con clasificación de nivel Tier I no cuenta con redundancia en ninguno de los componentes críticos, como la alimentación eléctrica y la refrigeración. Por lo tanto, cualquier mantenimiento programado o una falla en uno de estos subsistemas puede provocar una interrupción del servicio.
- Aplicaciones: un CPD Tier I suele utilizarse para pequeñas empresas o en instalaciones donde el tiempo de servicio ininterrumpido no es crítico. A menudo se emplea cuando las interrupciones planificadas son aceptables.
- Tiempo de actividad: el tiempo de actividad esperado es del 99,671%, lo que equivale a un tiempo de inactividad anual de aproximadamente 28,8 horas.
- Características:
    - Sin redundancia en los componentes críticos.
    - Adecuado para cargas de trabajo no críticas.
    - Susceptible a interrupciones por mantenimiento o fallos.

2.1.3.2 Tier II: Infraestructura con componentes redundantes

- Descripción: los CPD categorizados en esta calificación presentan una evolución sobre su predecesor al incorporar algunos componentes redundantes en infraestructuras críticas; como el mecanismo de enfriamiento o el suministro energético entre otros. Aunque no son redundantes al 100%, estos CPD pueden soportar cierto tiempo de inactividad en algunos elementos críticos sin que ello deba repercutir en las operaciones.
- Aplicaciones: son ideales para las PYME,s 9, que buscan un nivel de disponibilidad alto, aunque se puedan tolerar tiempos de inactividad debido a que no todas sus operaciones requieren ser permanentemente continuas.

[9] Pequeñas y medianas empresas,

- Tiempo de actividad: el tiempo de actividad de los CPD de nivel Tier II es del 99,741%, lo que se traduce en un tiempo de inactividad anual de alrededor de 22 horas.
- Características:
    - Redundancia parcial en sistemas críticos.
    - Capacidad para operar ante fallos menores.
    - Menos susceptible a fallos comparado con Tier I.

2.1.3.3 Tier III: Infraestructura con redundancia N+1

- Descripción: los CPD de nivel Tier III cuentan con la infraestructura N+1[10] en sus componentes principales, lo que se traduce en que los trabajadores pueden realizar mantenimiento programado sin afectar a los usuarios de los recursos.
- Aplicaciones: estos centros de datos son utilizados por empresas de mediano y gran tamaño, ya que sus servicios necesitan estar disponibles máximo tiempo. Estos centros son los más eficaces, ya que una vez que sus proveedores realicen el mantenimiento oportuno siguen funcionando. Son aptos para todas las aplicaciones críticas, como bases de datos, entornos de estreno de computadora y operaciones bancarias.
- Tiempo de actividad: el tiempo de actividad garantizado es del 99,982%, lo que significa un tiempo de inactividad máximo de 1,6 horas al año.
- Características:
    - Redundancia N+1 en todos los sistemas críticos (energía, refrigeración, redes).
    - Posibilidad de realizar mantenimientos sin interrumpir el servicio.
    - Alta disponibilidad, adecuada para servicios críticos.

2.1.3.4 Tier IV: Infraestructura completamente redundante

- Descripción: son la categoría más confiable y disponible posible. Esto se debe a una infraestructura aislada en todos los subsistemas, incluidas fuentes de alimentación eléctrica duales, sistemas de refrigeración redundados, redes duplicadas y otros subsistemas críticos. La arquitectura de un Tier IV puede soportar los fallos en cualquier subsistema sin afectar la general, lo que garantiza la máxima disponibilidad.
- Aplicaciones: son utilizados por las grandes empresas u organizaciones en las que se ejecutan aplicaciones críticas para la misión, como las instituciones financieras, servicios de telecomunicaciones y organizaciones incapaces de tener algún tiempo de inactividad. Los CPD Tier IV están diseñados para soportar desastres, cortes de energía de larga duración y cualquier otro tipo de fallos técnicos sin tener que dejar de operar.
- Tiempo de actividad: Los centros de datos Tier IV garantizan un tiempo de actividad del 99,995%, lo que equivale a menos de 26 minutos de inactividad al año.
- Características:
    - Redundancia 2N o superior en todos los sistemas (energía, refrigeración y redes).
    - Capacidad de soportar fallos múltiples sin interrupciones.
    - Diseñados para operaciones 24/7 (horas/días) sin interrupciones, incluso durante desastres.

[10] En configuración N+1, "N" es la cantidad de recursos que debe haber para mantener un funcionamiento normal y de +1 es un recurso que interviene en caso de una falla o bien me servirá para sustituir a uno de los N por mantenimiento.

Tier	Descripción	Disponibi-lidad esperada	Característica principal	Tiempo máximo de inactividad anual
Tier I	Infraestructura básica, con capacidad limitada de redundancia y capacidad de tolerancia a fallos.	99,671%	No tolera fallos. Tiene un solo camino de distribución de energía y refrigeración.	28,8 h
Tier II	Infraestructura con componentes redundantes para ofrecer más protección contra interrupciones.	99,741%	Redundancia parcial. Suministro redundante de algunos componentes, pero no todo el sistema.	22 h
Tier III	Infraestructura que permite mantenimiento sin afectar la operación, pero no tolera fallos simultáneos.	99,982%	Mantenimiento concurrente. Redundancia N+1 en los sistemas principales.	1,6 h
Tier IV	Infraestructura completamente tolerante a fallos, diseñada para mantener la operación ante cualquier eventualidad.	99,995%	Tolerancia a fallos total. Redundancia 2N en todos los sistemas críticos.	0,4 h

Tabla 2-1. Clasificación de los niveles TIER en los CPD [4]

2.1.4 Arquitecturas y diseños comunes en los CPD

Además de los niveles de clasificación Tier, los CPD pueden presentar diferentes arquitecturas y enfoques de diseño que influyen en su rendimiento, escalabilidad y eficiencia. Entre los diseños de CPD más comunes se pueden destacar los siguientes:

- **CPD modular:** este tipo de diseño permite construir el centro de datos por módulos, lo que facilita la escalabilidad. Es fácil añadir o quitar módulos a medida que el centro de datos crece y adquiere necesidades de capacidad. Los CPD modulares también son más eficientes desde el punto de vista de energía y refrigeración. En la figura 2-3 aparece un CPD modular

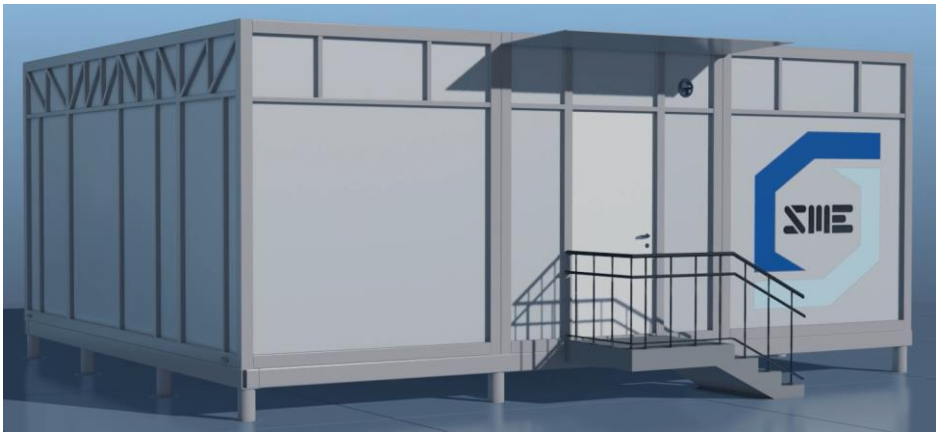


Figura 2-3 CPD modular (Fuente: SME Soluciones 2024) [5]

- **CPD en la nube**: muchas organizaciones optan por utilizar centro de datos basados en la nube, o CD de nube, que son manejados por terceros como proveedores[11],. Estos centros de datos se caracterizan por su gran flexibilidad y escalabilidad, lo que permite a las empresas pagar solo por los recursos consumidos en lugar de mantener la infraestructura física.
- **CPD edge**: Con el auge de la *IoT* y la necesidad de procesar datos en tiempo real, los centros de datos locales, o los CPD de borde, se están volviendo más populares. Estos centros de datos se caracterizan por estar ubicados cerca de los usuarios finales o los dispositivos, lo que reduce la latencia y mejora la velocidad de procesamiento. En la figura 2-4 se representa gráficamente una compatación entre edge computing versus coud computing.

Respecto a los ámbitos de aplicación en España, la mayoría de los centros de datos líderes se ubican cerca de Madrid y Barcelona, ya que la proximidad a la infraestructura eléctrica y de transmisión es de importancia crítica. Al mismo tiempo, hay iniciativas CPD en regiones como Aragón, ya que los costos de enfriamiento están disminuyendo como resultado del clima local.

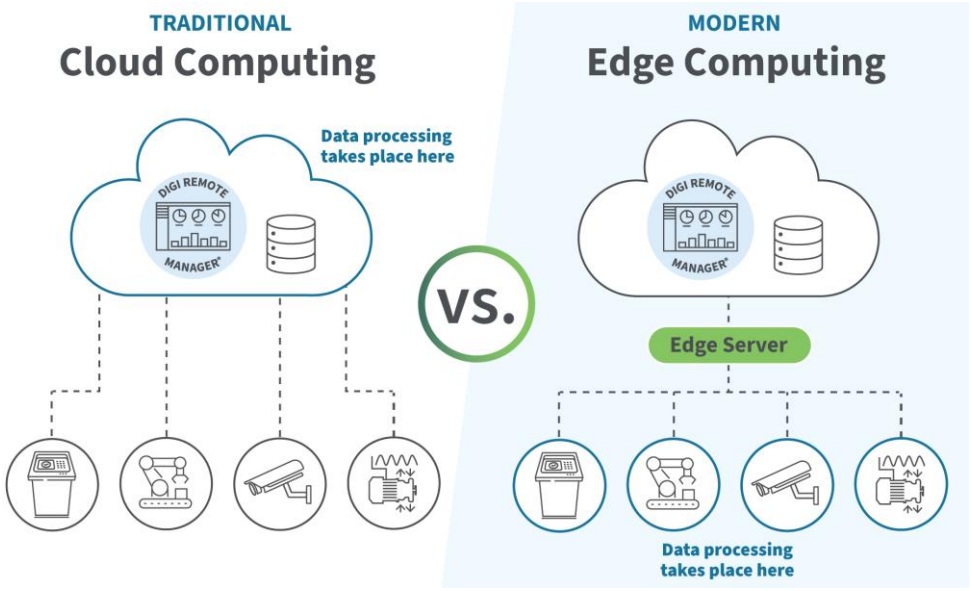


Figura 2-4 Edge Computing vs Cloud computing (Fuente: DIGI Internacional 2024) [6]

2.2 CPD sostenibles

La sostenibilidad en los CPD basados en un enfoque verde, es un producto relativamente nuevo en la esfera comercial. Compartir la responsabilidad de la introducción de innovaciones medioambientales en los negocios se ha vuelto cada vez más importante en los últimos años, debido al crecimiento del número de CPD, el uso intensivo de energía y la descarga intensiva de dióxido de carbono (CO_2).

Se calcula que los CPD, son responsables de hasta el 1% del consumo mundial de energía [1], y mucho más si no se toman medidas para aumentar la eficiencia energética. Los mayores agresores del planeta en esta dirección son los CPD de grandes empresas tecnológicas y proveedores de servicios en la nube. El enfoque verde se presenta como una reducción del consumo de energía de los CPD y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero gracias a la tecnología y los CPD mejorados que se están implementando.

[11] Entre los proveedores de servicios más importantes se encuentras: *Amazon Web Services*, *Microsoft Azure* y *Google Cloud*.



Figura 2-5 CPD con placas solares y renovables (Fuente: Data Center Market 2024) [7]

2.2.1 Green data center

Un centro de datos verde o sostenible [8] es un CPD que ha sido diseñado y ejecutado centrado en la eficiencia energética y en reducir su impacto ambiental. Estos centros no son solo recomendables; son una responsabilidad social que el entorno empresarial debe de tener en cuenta.

2.2.2 Diferencias entre un data center y un green data center

Los centros de datos convencionales suelen depender de energías provenientes de *combustibles fósiles*, lo que genera un impacto significativo en las emisiones de carbono. En contraste, los centros de datos sostenibles apuestan por el uso de *energías renovables* y tecnologías de alta eficiencia energética para minimizar su huella ambiental. Su enfoque incluye reducir el consumo de electricidad, implementar sistemas de refrigeración más eficientes y establecer prácticas de gestión de residuos que sean respetuosas con el medio ambiente. Estos cambios buscan alinear la operación de los centros de datos con los objetivos de sostenibilidad global.

Algunas de las diferencias entre un *data center* y un *green data center* son:

- Menor huella de carbono.
- Materiales de construcción sostenibles.
- Paisajismo sostenible.
- Reciclaje de residuos electrónicos.
- Convertidores catalíticos en los generadores de reserva.
- Uso de energías alternativas.

2.2.3 Condiciones para que un data center sea verde

Hay varias maneras de hacer que un centro de datos funcione de maneras diferentes y sea más amigable con el medio ambiente:

- Consolidar servidores: es importante apagar aquellos servidores que no se estén utilizando y optimizar al máximo los existentes para mejorar la eficiencia operativa.
- Actualizar la infraestructura tecnológica: sustituir servidores obsoletos por modelos más modernos y energéticamente eficientes ayuda a reducir el consumo eléctrico.
- Reciclaje y reutilización de equipos: es fundamental dar una segunda vida a los equipos, ya sea reutilizándolos o reciclándolos de forma responsable, para disminuir las emisiones asociadas con la fabricación de nuevos dispositivos.

- Supervisar el consumo de energía: un monitoreo continuo de los servidores permite detectar ineficiencias, optimizar el uso energético y retirar aquellos equipos que ya no sean necesarios.
- Adoptar métodos de refrigeración natural: aprovechando el aire exterior.
- Optimizar la gestión del aire: rediseñar los sistemas de circulación y enfriamiento de aire del centro de datos para evitar la recirculación de aire caliente, mejorando así la eficiencia térmica.
- Certificar edificios ecológicos: utilizar estándares y programas de certificación verde, como Liderazgo en energía y Diseño Ambiental (LEED) o Método de Evaluación Ambiental del Establecimiento de Investigación en Construcción (BREEAM), para garantizar que el diseño y la operación del centro de datos cumplan con altos niveles de sostenibilidad y rendimiento.

2.2.4 Ventajas de los green data center

Los centros de datos ecológicos maximizan no solo el ahorro de energía, sino también reduce el impacto medioambiental.

2.2.4.1 Reducir el impacto en el medio ambiente

Con la implementación de centros de datos sostenibles, será más viable utilizar fuentes de energía renovables y tecnologías con menor consumo energético para su funcionamiento. Estos centros podrían lograr una reducción en las emisiones de CO_2 en comparación con los centros de datos tradicionales.

2.2.4.2 Consumir menos energía

Es fundamental para el desarrollo y la prosperidad de cualquier empresa contar con un centro de datos que sea eficiente en cuanto a su consumo eléctrico, por lo que aumentar la eficiencia energética se convierte en una alternativa recomendable para todas las compañías. Un centro de datos ecológico es capaz de mantener las temperaturas ideales para reducir el consumo de energía.

2.2.4.3 Uso de almacenamiento de nueva generación

Las soluciones de almacenamiento tradicionales son complejas, costosas y difíciles de administrar, requiriendo constantes inversiones para su mantenimiento. En contraste, las nuevas propuestas de almacenamiento priorizan la simplicidad, la eficiencia y la escalabilidad, garantizando una gestión optimizada del almacén.

2.2.4.4 Disminución del gasto

Los centros de datos tradicionales tienen un alto consumo energético, lo que incrementa significativamente los costos operativos. En cambio, los centros de datos verdes implementan supervisión continua y servicios de gestión energética eficientes, lo que disminuye el consumo, reduce las facturas y consecuentemente supone un mayor ahorro.

2.2.4.5 Mejora de la reputación entre clientes y empleados

La eficiencia energética, la reducción de costos y la sostenibilidad ambiental son algunos de los principales beneficios que ofrecen los centros de datos ecológicos, contribuyendo a un modelo de negocio más responsable y competitivo.

Estas estrategias no solo optimizan recursos, sino que también alinean a las empresas con las expectativas de sostenibilidad globales y las preferencias de un mercado cada vez más consciente.

2.2.5 Problemas de los centros de datos verdes

A pesar de todas sus ventajas, la tarea de consolidar centros de datos sostenibles no es tarea fácil. Todavía existe la posibilidad de aumentar considerablemente la eficiencia energética, sin embargo, será vital hacer inversiones en tecnologías avanzadas para computación, almacenamiento y disipación de calor. Al mismo tiempo, será necesario dedicar recursos a energías renovables como la solar o el hidrógeno verde para reducir los impactos climáticos. Además, es importante señalar que la eficiencia energética en los Green Data Center va más allá del uso adecuado de la energía. Es igualmente importante disminuir las emisiones de CO_2 a través de un diseño eficaz.

2.3 Principios de gestión y diseño de infraestructuras sostenibles

El diseño y la gestión de infraestructuras sostenibles [9] en CPD se rigen por una serie de *principios fundamentales* con el objetivo de minimizar el impacto en el medio ambiente, optimizar el uso de recursos y garantizar la eficiencia operativa a largo plazo. La sostenibilidad en el contexto de los CPD no se produce exclusivamente por la presión reglamentaria y social, sino también debido a los costos operativos en declive y la necesidad ascendente de capacidad de procesamiento y almacenamiento de datos. A continuación, se describen estos principios fundamentales.

2.3.1 Eficiencia energética

Uno de los mayores desafíos de los CPD es el consumo energético. Dado que los CPD requieren grandes cantidades de energía para mantenerse en funcionamiento de forma continua y fiable, optimizar el uso de energía es crucial para reducir tanto los costes de explotación como la huella de carbono. Las estrategias para lograr la eficiencia energética incluyen:

- **Procesadores de bajo consumo**: es crucial utilizar *hardware* de bajo consumo como servidores de alta eficiencia energética o procesadores diseñados para minimizar el consumo energético sin sacrificar el rendimiento. Algunas tecnologías, como las arquitecturas ARM[12], que tienen una mayor eficiencia energética que X86[13], son cada vez más habituales en entornos de CPD.
- **Sistemas de gestión de energía inteligente**: los sistemas de gestión energética permiten ajustar dinámicamente el consumo energético según la demanda. Estos incluyen herramientas de software que monitorizan y controlan el uso de energía de los servidores, reduciendo o aumentando su rendimiento en tiempo real y apagando equipos inactivos para evitar el desperdicio.
- **Mediante indicadores clave:** como la efectividad del uso de la energía (**PUE)[14],** la efectividad del uso del agua **(WUE)**[15] y la tecnología de interconexión de centros de datos **(DCi)[16]** utilizan métricas para medir la eficiencia energética de un CPD (En el capítulo 3 se desarrollan estos indicadores)**.**

[12] *ARM: "Advanced RISC Machine*" o máquina RISC avanzada, donde *RISC* significa *"Reduced Instruction Set Computer".*

[13] Término utilizado para designar la familia de microprocesadores basada en los microprocesadores Intel 8086 y 8088.

[14] *Power Usage Effectiveness:* métrica para medir la eficiencia y determinar el consumo energético en los CPD.

[15] *Water Usage Effectiveness:* métrica para ayudar a los centros de datos a medir la cantidad de agua que utiliza una instalación para refrigeración y otras necesidades del edificio.

[16] *Data center* interconnect: tecnología de interconexión de centros de datos. Conecta dos o más centros de datos juntos en distancias cortas, medianas o largas usando la conectividad óptica de paquetes de alta velocidad.

2.3.2 Diseño modular

Otra tendencia importante en CPD es el diseño modular. Los CPD modulares están diseñados para ser más flexibles y escalables en términos de su tamaño y capacidad. Esto significa que una empresa no necesita realizar obras de elevado coste y realizar costosas interrupciones de sus operaciones para cambiar el tamaño de las instalaciones. Los beneficios más notables del diseño modular son los siguientes:

- **Flexibilidad operativa**: a medida que aumenta la demanda de capacidad de procesamiento, se puede instalar un módulo adicional de inmediato. Del mismo modo, estos módulos se pueden desactivar o retirar rápidamente si las demandas se han reducido.
- **Ahorro en costes**: el diseño modular permite a las empresas no sobredimensionar el tamaño de sus instalaciones desde el principio. En lugar de construir un CPD demasiado grande, que podría no cumplirse durante muchos años, una empresa puede comenzar con una escala más pequeña e ir ampliando gradualmente, adaptándose a las necesidades de cada proyecto.
- **Menor impacto ambiental**: el diseño modular también implica un menor impacto ambiental. Todos los recursos se utilizan de manera más eficiente y solo cuando sea necesario. Además, muchos módulos están hechos de materiales sostenibles y pueden reciclarse fácilmente al final de su vida útil.

2.3.3 Refrigeración eficiente

El sistema de refrigeración es otro aspecto clave en el funcionamiento de un CPD, ya que mantiene la temperatura óptima de los equipos en funcionamiento y evita el sobrecalentamiento. No obstante, los sistemas de refrigeración convencionales, como el aire acondicionado, son responsables de gran parte del consumo de energía de un CPD. Entre las medidas más utilizadas para reducir este impacto se encuentran:

- **Aprovechamiento de las condiciones climáticas locales**: en muchas regiones de climas fríos, los CPD pueden aprovechar las bajas temperaturas exteriores a través del *free cooling* en lugar de aire acondicionado, que puede disminuir el consumo de energía en refrigeración
- **Sistemas de enfriamiento pasivo**: la implementación de nuevas tecnologías ha hecho posible reformar los sistemas de enfriamiento para ahorrar energía.
    - *Refrigeración adiabática:* utilizando la evaporación del agua y altos niveles de humedad, este sistema puede enfriar el aire sin utilizar la energía adicional. El sistema refrigera aire caliente permitiendo contacto con el agua evaporada, lo cual reduce la temperatura del CPD a un nivel ideal.
    - *Free cooling:* utilizando el aire exterior en regiones con clima muy frío o moderado, donde se puede usarse en lugar del aire acondicionado. De hecho, puede ahorrar hasta un 40% de energía desperdiciada en enfriar sistemas.
- **Aislamiento y distribución del calor:** barreras térmicas y flujos de aire bien diseñados dentro del CPD puede significar un uso mucho menor de energía para alcanzar y mantener las temperaturas de operación adecuadas.

Esto no solo reduce los gastos de energía, sino también prolonga la vida útil de los servidores debido a las condiciones térmicas más estables en que operan.

En la tabla 2.2 se realiza una comparación con los diferentes consumos energéticos y su Pue de las diferentes tecnologías de refrigeración

Tecnología de Refrigeración	Eficiencia Energética (PUE)	Consumo Energético Relativo (%)
Refrigeración por aire (pasiva)	1,1 – 1,3	100%
Enfriamiento por agua fría	1,2 – 1,4	85% - 95%
Free cooling (refrigeración por aire exterior)	1,05 – 1,2	60% - 80%
Enfriamiento líquido directo	1,1	70% - 85%
Refrigeración por inmersión líquida	1,01 – 1,1	40% - 60%

Tabla 2-2: Consumo energético con diferentes tecnologías de refrigeración [10]

2.3.4 Uso de energías renovables

Uno de los aspectos clave de toda infraestructura sostenible es la transición hacia *energías renovables*. El consumo eléctrico del CPD es comúnmente el principal factor contribuyente a una elevada huella de carbono de un CPD, y una de las prácticas internacionales defendibles es el suministro de electricidad de fuentes limpias. Las principales fuentes de energía renovable que se utilizan en los CPD incluyen:

- **Energía solar**: la energía solar fotovoltaica es muy factible en países con altos niveles de irradiación solar, como España. Los paneles solares instalados en el techo o en terrenos adyacentes pueden producir una parte significativa de la electricidad necesaria para sistemas informáticos.
- **Energía eólica**: en áreas con buenos recursos eólicos, los aerogeneradores pueden complementar la energía, sobre todo en ubicaciones aisladas de la red de electricidad convencional.
- **Almacenamiento de energía**: conjuntamente con las fuentes de energía renovable, los dispositivos de almacenamiento como sistemas de baterías son la solución para la intermitencia de estas fuentes debido a sus cambios de producción.

A parte de esto, el uso de fuentes renovables no solo reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también ayuda a estabilizar los precios durante toda su vida útil, ya que la energía solar y eólica, en particular, es financieramente más sostenible en el largo plazo.

Algunos ejemplos de la transición hacia el suministro de energía más sostenible se pueden ver en:

- Grandes empresas tecnológicas como *Google, Microsoft* y *Amazon Web Services* han invertido mucho dinero en energía renovable para operar centros de datos con energía 100% limpia en el futuro cercano.
- En España, empresas como Telefónica ya se están moviendo hacia el uso de energías renovables para alimentar sus grandes CPD, lo que demuestra la obligación de las empresas de reducir su huella de carbono.

2.3.5 Gestión sostenible del agua

Un recurso vital en muchos sistemas de refrigeración es el agua [11], por lo que la gestión del agua sostenible es otro aspecto muy importante de la sostenibilidad del centro de datos. Los centros de datos

más grandes consumen cantidades significativas de agua de enfriamiento, pero hay varias maneras en que se pueden intentar minimizar el desperdicio de agua:

- **Sistemas de recirculación**: esto permite reutilizar el agua en varias ocasiones para procesos de enfriamiento, lo que disminuye su consumo.
- **Captación de aguas pluviales**: la recolección de lluvia en algunos centros de datos en los que el agua de la lluvia es recogida, almacenada y vuelta a utilizar en el proceso de enfriamiento de los sistemas en operación, lo que disminuye la cantidad de agua potable consumida.
- **Refrigeración líquida directa**: en lugar de usar un sistema de enfriamiento común, un proyecto que depende de la disipación de calor del aire, instalar un sistema en línea para disipar el calor a través de la tubería.

Estas y otras medidas garantizan un uso más responsable del agua y cumplen con los objetivos globales diseñados para sostenibilidad, lo que garantiza un impacto limitado en el medio ambiente.

2.3.6 Reciclaje de calor residual

Una forma novedosa de abordar la sostenibilidad a través de la recuperación de *calor residual* generado en servidores. Muchos CPD han tenido éxito implementando sistemas que recopilan el calor desperdiciado y lo utilizan para fines como calefacción de edificios o agua caliente.

- Un ejemplo de esta práctica se encuentra en países como *Suecia* y *Finlandia,* donde algunos CPD se integran en sistemas de calefacción distrital, lo que significa que pueden enviar su calor residual recopilado a áreas residenciales y comerciales.
- Este enfoque no solo permite reducir el consumo energético de los sistemas de calefacción en otras instalaciones, sino que también disminuye el impacto ambiental del CPD.

2.4 Normativas y certificaciones

La normativas y certificaciones juegan un papel crucial para garantizar la sostenibilidad y eficiencia ambiental. Estas normas establecen las pautas sobre cómo deben construirse y operarse los CPD para minimizar su impacto ambiental, mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de carbono.

Los marcos y estándares son herramientas que ayudan a las organizaciones a medir e informar sobre su sostenibilidad. Las directrices suelen ser generales y no obligatorias, mientras que los estándares pueden ser adoptados por las jurisdicciones y convertirse en requisitos obligatorios.

El panorama de los marcos de sostenibilidad puede resultar confuso y complicado. Los operadores de centros de datos pueden utilizarlos como guía para estandarizar sus informes de sostenibilidad ambiental.

Estos marcos se pueden clasificar en tres categorías según su función o propósito:

• Establecimiento de objetivos: se utilizan para definir metas de sostenibilidad que sean creíbles, basadas en la ciencia y alcanzables. Los objetivos pueden ser tanto internos como externos. Por ejemplo, el marco de los *ODS* de las Naciones Unidas incluye 17 objetivos específicos que invitan a todos los países a actuar para fomentar la prosperidad mientras se protege el planeta. Ofrece una valiosa referencia para que las organizaciones establezcan sus propias metas internas. También cabe reseñar Iniciativa de Objetivos Basados en la Ciencia *(SBTi)*[17] *y RE100*[18].

[17] *Science Based Targets* (SBT) u Objetivos con Base Científica, son un conjunto de metas definidas para establecer una ruta clara para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

• Informes*:* los operadores de centros de datos pueden utilizar estos marcos como referencia para ofrecer información tanto cualitativa como cuantitativa que les ayude a evaluar su rendimiento en sostenibilidad. Entre otros, podemos destacar los siguientes:

- Junta de Normas de Contabilidad de Sostenibilidad (SASB).
- Proyecto de Divulgación de Carbono (CDP).
- Iniciativa Global de Informes (GRI).
- Índices de sostenibilidad Dow Jones (DJSI).
- Global Real Estate Sustainability Benchmark (GRESB).
- Grupo de Trabajo sobre Divulgaciones Financieras. Relacionadas con el Clima (TCFD).
- Estándar de Contabilidad y Presentación de Informes del Protocolo de GEI.
- ISO/IEC 30134: Tecnología de la información. Centros de datos. Indicadores clave de rendimiento.
- ISO 14604: Inventarios y verificación de emisiones de GEI.

• Certificación: proporcionan un medio para que las organizaciones certifiquen sus mejoras de sostenibilidad mediante el cumplimiento de un número mínimo de requisitos o puntos.

Entre las normativas y certificaciones más relevantes para la sostenibilidad de los CPD se destacan las siguientes:

2.4.1 ISO 50001: Sistema de Gestión de la Energía (SGE)

Es una norma internacional que establece los requisitos para implementar, mantener y mejorar un SGE. Ayuda a planear el camino para los CPD energéticamente eficientes al mismo tiempo que se reduce la huella de carbono y se minimiza el costo de la operación. El CPD aprovecha los beneficios de la ISO 50001 [12] a través de mejores prácticas de energía no solo porque es amigable con el medio ambiente sino también en términos económicos. La ISO 50001 sigue el ciclo de Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PHVA[19]), que es principalmente un proceso de mejora continua que garantiza que el uso de energía sea efectivo y se administre.

2.4.1.1 Planificación energética

El CPD deberá realizar una evaluación de aspectos energéticos para identificar los puntos de mayor consumo y de mayor impacto sobre el desempeño energético. Entre los más importante se relacionan los siguientes:

- Infraestructura del CPD (sistemas de refrigeración, iluminación, climatización, etc.).
- Equipamiento informático (servidores, unidades de almacenamiento, redes, UPS[20]).
- Operaciones de soporte (energía utilizada en procesos de mantenimiento, generadores de respaldo, etc.).

Objetivos energéticos

Estándares directamente relacionados con la evaluación de aspectos, el CPD deberá definir objetivos de ahorro energético cuantificables, como:

- Disminución del consumo energético de equipos específicos
- Instalación de sistemas de refrigeración más eficientes

[18] RE100 es la iniciativa corporativa mundial de energía renovable que reúne a cientos de empresas grandes y ambiciosas comprometidas con el uso de electricidad 100 % renovable.

[19] Ciclo *Deming*: estrategia iterativa de resolución de problemas para mejorar la gestión procesos e implementar cambios.

[20] *Uninterruptable Power Supply:* sistema de alimentación ininterrumpida (SAI). Dispositivo que, gracias a su sistema de baterías, proporciona energía eléctrica de forma independiente durante un tiempo limitado.

- Aumento del porcentaje de energía renovable en la matriz energética del CPD.

Planes de acción energéticos

Generación de planos de acción que indiquen el camino para lograr los objetivos, con asignación de responsabilidades, recursos y plazos. Dicho plan puede incluir la implantación de tecnologías de eficiencia energética como las siguientes:

- Uso de tecnologías de refrigeración eficaz.
- Virtualización de servidores para aprovechamiento integral de los recursos.
- Compra de equipos con pleno desempeño energético.

2.4.1.2 Implementación y operación

Después de definir la estrategia y los objetivos, el paso siguiente consiste en pasar a la implementación de las acciones y procesos definidos en el plano de acción energético.

- **Optimización de la infraestructura.** Para la optimización se puede utilizar las siguientes alternativas:
  - *Refrigeración*: implementar sistemas de refrigeración eficientes, como el uso de refrigeración líquida o enfriamiento por pasillo frío/caliente.
  - *Equipos de TI eficientes:* adquirir y poner en funcionamiento servidores y otros equipos informáticos con certificaciones de eficiencia energética.
  - *Monitoreo en tiempo real:* utilizar sistemas de monitoreo que permitan medir el consumo energético de los sistemas del CPD en tiempo real, lo cual ayuda a identificar puntos de ineficiencia y a realizar ajustes rápidos.
- **Uso de energías renovables**. Fomentar el uso de energía limpia (solar, eólica, hidráulica) para alimentar las operaciones del centro. Algunas de las medidas a adoptar podrían ser las siguientes:
  - *Instalar paneles solares en la infraestructura.*
  - *Compra de energía renovable de proveedores o inversión en certificados de energía renovable.*
- **Formación y sensibilización del personal**: capacitar a los empleados sobre el impacto de su energía y promover la buena conducta, como apagar equipos que no se usan, uso eficiente del aire acondicionado, etc.

2.4.1.3 Monitoreo, medición y verificación del desempeño energético

Para asegurarse de que las acciones que se implementen sean efectivas, se debe *monitorear continuamente* el desempeño energético del CPD, como se establece a continuación.

- **Indicadores clave de desempeño (KPIs)**: Establecer y medir KPIs relacionados con el desempeño energético, tales como:
  - *Consumo energético por unidad de computación (kWh/servidor, kWh/GB de almacenamiento).*
  - *Reducción de emisiones de CO2 asociada al consumo de energía.*
  - *Porcentaje de energía renovable utilizada.*
- **Auditorías energéticas internas**: se deben realizar auditorías energéticas internas periódicas para evaluar la conformidad con el sistema de gestión energética y las oportunidades de mejora

continua. Esto ayudaría a identificar ineficiencias o áreas donde ajustarse para optimizar el consumo de energía.

- **Sistema de gestión y control energético**: se debería implementar un sistema automatizado para monitorear y controlar los consumos de energía. El sistema debe poder identificar patrones de consumo, alertas por consumo excesivo o ineficiencias y requisitos de dotación de informes para la alta dirección.

2.4.1.4 Revisión y mejora continua

Finalmente, el último paso en el ciclo PHVA es revisar el desempeño y tomar medidas de acciones correctivas para mejorar el marco de gestión energética. Las acciones más relevantes a tomar serían las siguientes:

- **Revisión por la dirección**: las revisiones periódicas de alto nivel deberán llevarse a cabo para asegurarse de que el sistema de gestión de la energía está funcionando adecuadamente y se están logrando los objetivos. Las revisiones deben involucrar la evaluación de:
  - *Los resultados de las auditorías energéticas.*
  - *El progreso hacia los objetivos energéticos establecidos.*
  - *La identificación de nuevas oportunidades de mejora y la evaluación de las tendencias en el consumo energético.*
- **Acciones correctivas**: si los indicadores de desempeño energético no están logrando los objetivos indicativos, el CPD debe implementar acciones correctivas para abordar las causas subyacentes. Por ejemplo, si se descubre que el sistema de refrigeración no es tan eficiente como se esperaba, el CPD debe investigar tecnologías alternativas de refrigeración o ajustar el funcionamiento del sistema existente.
- **Actualización de objetivos y metas:** en base en los resultados de la revisión, el CPD debe actualizar sus metas de desempeño energético para reflejar cambios tecnológicos, condiciones de funcionamiento y prioridades estratégicas. Esta acción debe tomarse en el marco del ciclo de mejora contínua indicado por la ISO 50001.

Elemento	Descripción
Evaluación del impacto	Identificación de los aspectos ambientales
Mejora continua	Implementación de programas de mejora
Cumplimiento legal	Aseguramiento de conformidad con las normativas locales

Tabla 2-3 Elementos clave de ISO 14001 para CPD (Fuente: ISO 14001, 2020) [12]

2.4.1.5 Certificación ISO 50001

Después de la implementación y valoración del sistema de gestión energética, el CPD puede obtener la certificación ISO 50001. Significa una aprobación externa de la eficiencia energética y la gestión del CPD sobre el consumo e interés global para emprender.

Beneficios de Implementar la ISO 50001 en un CPD Sostenible

1. *Reducción de costos operativos:* al emplear acciones de eficiencia energética para cumplir con los niveles regulados, el CPD reduce el consumo de electricidad. La acción se traduce en pagos significativamente menores para cuentas de energía.
2. *Mejora de la sostenibilidad:* la ISO 50001 reducirá la cantidad de huella de carbono del CPD lo que apunta a la reasignación internacional de gas de invernadero
3. *Cumplimiento normativo:* la ISO 50001 reducirá la cantidad de huella de carbono del CPD lo que apunta a la reasignación internacional de gas de invernadero
4. *Ventaja competitiva*: una vez que el centro de datos está certificado como ISO 50001, su reputación se aprecia, y también se convierte en una organización extractiva ética debido al compromiso del cliente y el proveedor con la utilización de la energía
5. *Mejora continua:* se crea una mejora constante que impulsa el proceso de control del uso de la energía en el centro de datos, lo que facilita mantenerse al día con la tecnología y mecanismos innovadores de protección del medio ambiente, entre otros.

2.4.2 AENOR EA 004:2013

La certificación EA 004 [13] una norma técnica que establece los criterios y requisitos para sostener la gestión ambiental entre otros, de los CPD en España. Esta certificación, es una norma desarrollada y promovida por el Ministerio para la Transición Ecológica y el reto demográfico y la "Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid" (*Fenercom*) con la meta de reconocer y certificar aquellos centros de datos que realicen prácticas sostenibles para el ambiente disminuyendo su impacto ecológico a través de una buena gestión de los recursos, en especial el energético y del resguardo de la biodiversidad.

Para aplicar la certificación en un CPD, es importante alinearse con los principios de gestión ambiental, eficiencia energética y mejores prácticas de sostenibilidad.

A continuación, se describen las principales áreas de aplicación y cómo un CPD puede lograr cumplir con los requisitos de esta certificación.

2.4.2.1 Gestión del Consumo Energético

Con respecto a la certificación EA 004, uno de los principales elementos a cumplir se relaciona con el ahorro de energía en los centros de datos; estos consumen bastante electricidad, ya que debe suministrarse a los servidores y al mismo tiempo mantener la temperatura adecuada en las instalaciones. Al respecto, los elementos para los certificados exigen al centro de datos a ejercer estrategias de sostenibilidad con respecto al consumo de energía. Algunos de los elementos a tener en consideración son los siguientes:

- *Optimización de la infraestructura:* esto implica mejorar la eficiencia energética de los equipos de IT, como servidores, sistemas de almacenamiento y redes, asegurando que utilicen tecnologías de bajo consumo, como aquellos con *certificación Energy Star*[21].

[21] *Energy Star* es un programa de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos creado en 1992 para promover los productos eléctricos con consumo eficiente de electricidad www.energystar.gov.

- *Uso de sistemas de refrigeración eficientes:* refrigeración líquida y enfriamiento por pasillo frío/caliente de las soluciones avanzadas para la circulación del aire y el uso minino de energía en calefacción y enfriamiento.
- *Adopción de energías renovables*: de conformidad con la certificación EA 004, el centro de datos debe fomentar el consumo de energía limpia proveniente de fuentes renovables como la energía solar, eólica e hidroeléctrica.
- *Monitorización energética*: la instalación de los sistemas de monitoreo y medición de calefacción y agua caliente permiten cumplir con el mantenimiento del centro de datos a tiempo real.

2.4.2.2 Gestión de la Huella de Carbono

La certificación EA 004 fomenta la reducción de la huella de carbono de los CPD, lo cual es un aspecto esencial para cumplir con los objetivos de sostenibilidad.

- *Cálculo de la huella de carbono:* un centro de datos debe medir cuánto CO_2 emite en un año durante su operación. Esto incluye tanto las emisiones directas producidas por el centro de datos y la energía.
- *Estrategias de compensación:* una vez que las emisiones de carbono se han calculado, el CPD debería fijar planes para compensarlas. Esto podría ser comprando certificados de emisiones o invirtiendo en un proyecto de reforestación o una de energía renovable para compensar la huella de carbono de la organización.
- *Implementación de prácticas de eficiencia energética:* (como se mencionó anteriormente) la eficiencia energética y el cambio a una fuente de energía renovable son dos otras formas de reducir la huella de carbono de un CPD.

2.4.2.3 Uso Eficiente de los Recursos Naturales

La certificación EA 004 también pone énfasis en la gestión eficiente de los recursos naturales, incluidos el agua y los materiales. Además de ser grandes consumidores de energía, los CPD también tienen un gran impacto en el uso del agua, ya que es necesario para mantener las temperaturas bajas en todo el centro de datos. Para realizar un uso eficiente de los recursos habría que tomar las siguientes medidas:

- *Reducción del consumo de agua:* se incluye implementando sistemas de reciclaje del agua en torres de refrigeración y otras infraestructuras que dependen del agua para el enfriamiento. También puede incluir el uso de sistemas de refrigeración por evaporación que usan menos agua que los sistemas convencionales o la captura de aguas pluviales para uso interno.
- *Reutilización de equipos y componentes:* se centra en promover la economía circular dentro del CPD, donde los equipos informáticos como servidores y sistemas de almacenamiento son reciclados o reutilizados en lugar de desechados. Esto se logra estableciendo un programa sistemático de reciclaje de RSE[22] y asegurando que los equipos informáticos estén diseñados para ser fácilmente reciclables
- *Uso de materiales reciclados y ecológicos:* durante la construcción o renovación del CPD, se deben utilizar materiales reciclados o de bajo impacto ambiental en la alta disponibilidad

[22] Responsabilidad Social Empresarial (RSE) se refiere a las acciones voluntarias que las empresas llevan a cabo para gestionar sus impactos.

2.4.2.4 Minimización de residuos y gestión de residuos ecológicos

La *gestión de residuos* es un componente clave de la certificación EA 004, especialmente los generados por los equipos electrónicos y los procesos operativos de un CPD.

- *Gestión de residuos electrónicos (e-waste):* la mayoría de los centros de datos generan una cantidad significativa de residuos electrónicos, incluidos equipos obsoletos, cables, baterías y otros componentes. La certificación EA 004 exige que los centros de datos implementen procedimientos adecuados para la recolección, tratamiento y reciclaje de residuos electrónicos. Esto incluye colaborar con empresas especializadas en reciclaje de residuos electrónicos y desechar de manera segura los materiales peligrosos.
- *Reducción de residuos generales:* implementar prácticas para reducir los residuos en las operaciones diarias, como minimizar el uso de embalajes y emplear materiales biodegradables o reciclables en las instalaciones del centro de datos. Establecer protocolos para el reciclaje de papel, cartón y otros materiales comunes utilizados en las operaciones diarias.

2.4.2.5 Cumplimiento normativo y buenas prácticas ambientales

La certificación EA 004 requiere que el centro de datos cumpla con todas las regulaciones ambientales locales y nacionales relacionadas con la gestión de residuos, emisiones, uso de recursos naturales y eficiencia energética. El cumplimiento no solo implica adherirse a las normativas, sino también adoptar mejores prácticas para garantizar la sostenibilidad a largo plazo.

- *Cumplimiento de la legislación ambiental:* el centro de datos debe garantizar que sus operaciones cumplan con las regulaciones ambientales vigentes en España, como la Ley de Cambio Climático y la Regulación de Residuos Electrónicos[23]. Esto requiere auditorías regulares para asegurar que no se infrinjan las leyes ambientales.
- *Certificaciones complementarias:* además de la certificación EA 004, el centro de datos puede optar por obtener otras certificaciones complementarias de sostenibilidad, como ISO 14001 e ISO 50001.

2.4.2.6 Comunicación y formación ambiental

La sensibilización ambiental es esencial para la cultura y facilitador de la certificación EA 004. Esto implica la sensibilización de los empleados y la implementación de programas de formación continua.

- *Concienciación del Personal:* es esencial que todos los empleados de la instalación del CPD, desde los técnicos hasta los operadores, comprendan la importancia de las prácticas sostenibles. Determinados por la organización de talleres, charlas y actividades de concienciación sobre la gestión energética, la reducción de residuos y el uso eficiente de los recursos.
- *Formación continua:* capacitar a los empleados en mejores prácticas ambientales y la implementación de procesos sostenibles es esencial para garantizar la efectividad del sistema de gestión ambiental y alentar la contribución de todos los empleados a los objetivos de la CPD.

[23] *Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular.* «*BOE» núm. 85, de 09/04/2022.*

2.4.3 LEED

La normativa *LEED* [14] es un sistema de certificación de edificios sostenibles desarrollado por el Consejo de la Construcción Ecológica de Estados Unidos (USGBC)[24]. A nivel mundial, LEED se utiliza para evaluar el rendimiento ambiental de los edificios y promover prácticas de construcción más eficientes, más saludables y más respetuosas con el medio ambiente. Esta certificación se otorga no solo a los nuevos edificios sino también a los edificios en el sitio de construcción y operación de renovación existentes. Se puede otorgar esta certificación a cualquier edificio del entorno, como la construcción, la operación y la renovación del sistema financiero.

El objetivo de LEED es mejorar el rendimiento ambiental en varias áreas fundamentales, como el consumo de energía, el uso del agua, la calidad del ambiente interior, la selección de materiales, la sostenibilidad del sitio y la recaudación de gas invernadero. Aplicar LEED a un CPD del sistema automatizado sostenible significa aplicar este código de construcción y operaciones más responsables con el medio ambiente.

A continuación, se detallan las categorías de LEED que se pueden aplicar a un CPD para hacer una instalación de uso más eficiente y sostenible.

2.4.3.1 Sostenibilidad en el sitio

El propósito de esta categoría es reducir el impacto del CPD en el entorno local. Los criterios de esta categoría se obtienen en función de los siguientes aspectos:

- *Selección del sitio:* ubicar el CPD en un área con acceso a transporte público, para reducir la huella de carbono de los empleados.
- *Restauración ecológica del sitio:* en caso de ser destacado, busque restaurar áreas verdes o utilice dispositivos de manejo de agua sostenible para regar el área.
- *Control de la luz artificial*: organización de la contaminación lumínica local y su control.

2.4.3.2 Eficiencia en el uso del agua

EL CPD es un consumidor de grandes cantidades de agua, principalmente en sistemas de refrigeración y otros procesos. Las acciones a tomar serían las siguientes:

- *Uso eficiente del agua:* instalar dispositivos de ahorro de agua, como grifos, inodoros y sistemas de riego que minimicen el consumo sin que afecte al rendimiento.
- *Reutilización de agua:* Aprovechar aguas pluviales o aguas grises para los sistemas de refrigeración y riego.
- *Sistemas de refrigeración sin agua:* utiliza sistemas de refrigeración de alta eficiencia que no dependan del agua en su operación, por ejemplo, la refrigeración por aire en lugar de la refrigeración por agua

2.4.3.3 Energía y atmósfera

Uno de los pilares de LEED es la reducción del consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero.

[24] *U.S. Green Building Council:* organización sin ánimo de lucro que promueve la sostenibilidad en el diseño, construcción y funcionamiento de los edificios en EE. UU.

- *Eficiencia energética:* utiliza un diseño de infraestructura alta eficiencia energética, incluyendo iluminación de diodo emisor de Luz (LED)[25], sistemas de climatización de alta eficiencia, y servidores optimizados.
- *Energías renovables:* utiliza la energía solar o eólica para abastecer al CPD, o adquiere energía verde de la red.
- *Optimización del rendimiento energético:* implementa un sistema de gestión de energía que esté en línea, y sea monitoreado y que te permita tomar acciones inmediatas.
- *Uso de refrigerantes ecológicos:* evita el uso de refrigerantes con alto potencial de calentamiento global en sistemas de aire acondicionado y refrigeración.

2.4.3.4 Materiales y recursos

Los materiales utilizados en la construcción y en la operación del CPD debe ser cuidadosamente seleccionados para asegurarse que tengan un mínimo impacto ambiental.

- *Materiales reciclados o de bajo impacto:* utiliza materiales de construcción reciclados como acero reciclado o madera certificada por el FSC. (*Forest Stewardship Council*)[26].
- *Estrategias de reciclaje:* implementa prácticas de gestión de desechos que aseguren que los residuos de construcción sean reciclados o reutilizados de manera adecuada.
- *Reducción de residuos de construcción*: minimiza la cantidad de residuos generados durante la construcción o la remodelación.

2.4.3.5 Calidad ambiental interior

El ambiente interior es esencial para el bienestar de los empleados y la eficiencia de los equipos.

- *Control de la calidad del aire interior:* asegurar que los materiales de construcción no liberen compuestos orgánicos volátiles (COV)[27] nocivos, que puedan afectar la salud de los ocupantes. Además, deben garantizar una adecuada ventilación.
- *Iluminación natural:* maximizar la luz natural mediante el uso de ventanas de alto rendimiento y edificación con orientación solar adecuada, de modo que se ilumine tanto con luz natural como sea posible para ahorrar iluminación eléctrica durante el día.
- *Control térmico y acústico:* calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC[28]) de alto rendimiento para controlar las condiciones térmicas y la humedad. Asimismo, el control del ruido es esencial para garantizar un entorno de trabajo saludable.

2.4.3.6 Ubicación y transporte

Fomentar la accesibilidad del CPD para reducir el impacto del transporte. Sería necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- *Acceso a transporte público:* elegir un sitio cerca de la estación de transporte público o proporcionar transporte sostenible para los empleados (ej. bicicletas eléctricas).

[25] *Light Emitting Diode.*

[26] El *FSC* es una organización internacional sin fines de lucro que se dedica a promover la gestión responsable y sostenible de los bosques en todo el mundo. Establece un sistema mundial de certificación forestal establecido para bosques y productos forestales. www.fsc.org.

[27] *COV*: todos aquellos hidrocarburos que se presentan en estado gaseoso a la temperatura ambiente normal o que son muy volátiles a dicha temperatura.

[28] *Heating, Ventilation, and Air Conditioning.*

- *Estacionamiento para bicicletas y vehículos eléctricos:* proporcionar espacios para bicicletas y estaciones de carga para vehículos eléctricos.

2.4.3.7 Gestión de la energía en la cadena de suministro

También puede incluir la gestión sostenible de los equipos y servicios utilizados para mantener la operación de un centro.

- *Elección de proveedores responsables:* seleccionar equipos y servicios que sean energéticamente eficientes y ambientalmente responsables, y que provengan de proveedores que también estén comprometidos con la sostenibilidad.

2.4.3.8 Gestión inteligente del agua y la energía

Además de las estrategias anteriores, un CPD debe integrar *tecnologías de automatización* que gestionen de manera eficiente el consumo de recursos, ajustando el funcionamiento de los sistemas según las necesidades reales.

2.4.4 BREEAM

BREEAM [15] es uno de los sistemas de certificación más utilizados a nivel mundial para la evaluación de la sostenibilidad de edificios. BREEAM se ha establecido como un referente internacional en la evaluación ambiental de la construcción. BREEAM está diseñado para promover las mejores prácticas en la construcción y operación de edificios.

Aplicar la normativa BREEAM a un CPD sostenible implica adoptar ciertas prácticas y tecnologías que puedan disminuir el impacto en la ecología de construcción y mejorar la eficiencia operativa. Debido a que un CPD es un usuario particular energéticamente intensivo, necesitando un funcionamiento 24/7 de los servidores y la refrigeración, la sostenibilidad se encuentra en elecciones conscientes como eficiencia energética, uso de agua, calidad de aire interior, y selección de materiales sostenibles.

A continuación, se describirán varios aspectos de cómo se puede aplicar el marco BREEAM para hacer que un CPD sea más sostenible y verde.

2.4.4.1 Gestión

En esta categoría, se examina cómo se gestiona el tema de la sostenibilidad mientras se construye y se ocupa por un edificio a lo largo de la vida. Para un CPD algunas de las estrategias más destacables serían:

- *Gestión del proyecto sostenible:* es importante que todos los equipos de proyecto, diseño, construcción, y operación de un CPD tengan un enfoque intensivamente sostenible. Incluye tanto la contratación de empresas que ya tiene experiencia con la construcción verde y también mantener un sistema de gestión de medio ambiente durante la ocupación.
- *Planificación de la sostenibilidad en el ciclo de vida:* incluir en el plan de gestión la optimización de la eficiencia energética, la reutilización de recursos y la reducción de residuos durante toda la fase del ciclo de vida del CPD.

2.4.4.2 Salud y bienestar

Los CPD son espacios de equipos electrónicos y servidores, pero también están empleados con personas para el mantenimiento y control. Para la comodidad de los empleados, es esencial:

- *Calidad del aire interior:* implementar sistema de ventilación con alta eficacia para que exista calidad en el aire. Uso del filtro de recogedor de partículas de alta eficiencia (HEPA)[29] y sistemas de ventilación controlados, son esenciales para reducir contaminantes.
- *Comodidad térmica:* incluir algunas disposiciones para los ocupantes humanos y los dispositivos electrónicos garantizan que el CPD esté a una temperatura agradable. Trabajando en conjunción con sistemas de climatización de alta eficiencia acondicionadores de aire.
- *Iluminación natural:* debe implementarse en un lugar con varias ventanas y lucernarios de alto rendimiento para iluminar el centro durante el día y reducir la dependencia de las luces eléctricas.

2.4.4.3 Energía

La eficiencia energética es una de las prioridades más importantes para un CPD sostenible, ya que el consumo de energía de un centro de datos puede ser muy alto.

- *Eficiencia energética:* diseñar la infraestructura del CPD para minimizar el consumo, como un sistema de climatización efectivo, iluminación a base LED y sensores utilizados para optimizar las cargas de corriente.
- *Uso de energías renovables:* el CPD debe hacer uso activo de energías renovables a través de paneles solares fotovoltaicos, turbinas eólicas.
- *Eficiencia en sistemas de refrigeración*: también es importante la refrigeración, ya que un sistema ultramoderno con refrigeración líquida, refrigeración natural con aire reducen el consumo.
- *Gestión de la demanda energética:* las tecnologías de administración basadas en el trabajo en tiempo real pueden racionalizar el uso artificial.

2.4.4.4 Transporte

Aunque un CPD generalmente no genera un gran volumen de tráfico, es importante garantizar que el acceso al centro sea eficiente y sostenible.

- *Accesibilidad al transporte público:* es fundamental ubicar el CPD en un lugar con fácil acceso a transporte público e integrar soluciones para el transporte de los empleados en vehículos eléctricos o compartidos.
- *Estacionamiento para bicicletas y vehículos eléctricos:* es importante proporcionar un espacio para las estaciones de carga de vehículos y bicicletas eléctricos, animando a la movilidad sostenible entre los empleados y los visitantes de los CPD.

2.4.4.5 Agua

El consumo de agua también puede ser considerable en un CPD, especialmente en el sistema de enfriamiento de aquí la necesidad de reducir su uso, teniendo en cuenta estos aspectos:

- *Uso eficiente del agua:* instalar dispositivos de ahorro de agua en inodoros y grifos de bajo consumo.
- *Reciclaje de aguas grises[30]:* instalar un sistema que trate y recicle el agua gris, por ejemplo, el agua proveniente del drenaje del techo para su exclusiva utilización en el sistema de enfriamiento o riego.

[29] *High Efficiency Particle Arresting*.
[30] *Las aguas grises son aguas residuales de sistemas de plomería que no son sanitarios.*

- *Enfriamiento sin agua:* en lugar de los sistemas de enfriamiento de agua, el uso de enfriadores sin agua y tecnología *free cooling* como el enfriamiento gratuito, eliminan la necesidad de agua en su funcionamiento.

2.4.4.6 Materiales

La selección de materiales es esencial para reducir el impacto ambiental de la construcción y operación del CPD.

- *Materiales sostenibles y reciclados:* utilizar materiales con baja huella de carbono, como acero reciclado, madera certificada por el FSC y materiales de construcción que sean reciclables o reutilizables.
- *Reducción de emisiones de los materiales:* Seleccionar materiales con bajo impacto ambiental, que no liberen COV u otros contaminantes.

2.4.4.7 Residuos

La gestión adecuada de residuos es fundamental durante la construcción y operación de un CPD.

- *Gestión de residuos durante la construcción:* minimizar las cantidades de residuos generadas durante la construcción, promover la reutilización de productos y el reciclaje de escombros.
- *Gestión de residuos operativos:* implementar un plan de manejo de desechos electrónicos adecuado en la etapa de operación que incluya la reutilización de productos como cartuchos de tinta y papel.

2.4.4.8 Uso del sitio

La sostenibilidad del sitio es importante para mitigar el impacto ambiental del CPD en su entorno.

- *Selección del sitio:* evitar la construcción en áreas ecológicamente sensibles y priorizar la reutilización de terrenos previamente desarrollados.
- *Restauración ecológica:* si se desarrolla en un sitio vacío o en un área degradada, restaurar la vegetación local y crear hábitats para la fauna local.

Dependiendo de la ubicación geográfica y las necesidades específicas del proyecto, uno u otro sistema puede ser más adecuado. Sin embargo, ambos sistemas pueden contribuir significativamente a la sostenibilidad de un CPD.

En el Anexo I (Comparativa LEED vs BREEAM) se realiza un análisis de las principales características y criterios de los sistemas LEED y BREEAM en relación con los CPD. Se comparan aspectos como la eficiencia energética, gestión del agua, uso de materiales, refrigeración y climatización, etc.

2.5 Aplicación de métricas para CPD

2.5.1 Objetivo

Elegir métricas estandarizadas para informar sobre la sostenibilidad es crítico para abordar los desafíos planteados anteriormente. Antes de que *The Green Grid*[31] propusiera el PUE en 2007, no existía una métrica estandarizada para vigilar la utilización energética de un centro de datos en su

[31] *"The Green Grid Association"* es una organización de EE.UU. afiliada del Consejo de la Industria de Tecnología de la Información. Trabaja por la optimización de la eficiencia energética y de recursos de los ecosistemas de los CPD.

totalidad, lo que generó problemas en la comparación y vinculación de los centros de datos. Aunque una métrica no es perfecta, si se estandariza y expresa una definición y uso claros, será valioso.

La métrica PUE ganó una amplia aceptación y ayudó a impulsar mejoras en la eficiencia de las instalaciones de los centros de datos en toda la industria (según una encuesta global realizada por el *Uptime Institute* de gerentes de TI y centros de datos en 2020) el PUE anual promedio de los grandes centros de datos había cambiado de 2,5 a 1,59 en comparación con 2007. Algunos centros de datos gigantes de Internet como *Google, Facebook, Baidu,* han conseguido un PUE de 1,1 o incluso inferior.

2.5.2 Métricas utilizadas

La sostenibilidad ambiental implica preservar los recursos naturales como el aire, el agua y el suelo para garantizar su disponibilidad para las generaciones futuras. Para los centros de datos, se proponen métricas que aborden esta sostenibilidad de manera integral en cinco áreas clave. Estas métricas proporcionan un enfoque estructurado para evaluar y mejorar el impacto ambiental de estas instalaciones.

A continuación, se van a definir unas métricas estandarizadas [16] que nos facilitan la información de sostenibilidad ambiental del CPD. Se han propuesto cinco categorías de métricas para que los operadores de centros de datos establezcan objetivos que aborden la sostenibilidad ambiental de sus centros de datos.

2.5.2.1 Energía

Con el crecimiento continuo del sector, optimizar la eficiencia energética y minimizar el consumo se convierten en prioridades esenciales en su transición hacia la sostenibilidad. Además de implementar operaciones más eficientes, el uso de fuentes de energía renovable contribuye significativamente a reducir las emisiones de GEI asociadas al consumo eléctrico.

Medir y reportar datos relacionados con el uso de energía, la eficiencia energética y la integración de energías renovables permite a los operadores de centros de datos demostrar avances concretos en la reducción de su huella de carbono. Estas acciones son fundamentales para alinear las operaciones de los centros de datos con los objetivos globales de sostenibilidad y mitigación del cambio climático. A continuación, se representan las siguientes métricas:

- **Consumo total de energía**

El consumo total de energía incluye toda la energía utilizada para operar un centro de datos, que generalmente proviene de la red eléctrica, pero también puede proceder de generadores, sistemas solares, eólicos, gas natural, vapor o agua refrigerada. Este cálculo es clave, ya que una gran parte de las emisiones de carbono de los centros de datos está relacionada con el consumo energético. Conocer el consumo total es esencial para mejorar la eficiencia y reducir la huella de carbono asociada.

- **Eficacia del uso de energía (PUE)**

El PUE se calcula dividiendo la carga total del centro de datos entre la carga de TI, lo que mide la eficiencia energética de la instalación. Es una métrica ampliamente utilizada que permite evaluar el diseño y la operación de los centros de datos. Aunque no es perfecta, su simplicidad facilita a los operadores optimizar el consumo de energía no relacionado con TI y compararlo entre diferentes centros, considerando el tamaño, la resiliencia y el clima.

- **Consumo total de energía renovable**

Esta métrica abarca la energía renovable que el centro de datos genera, controla o adquiere, incluyendo fuentes como solar, eólica, geotérmica e hidroeléctrica. Sustituir energías basadas en combustibles fósiles por renovables, ayuda a las organizaciones a reducir emisiones y avanzar hacia estrategias de carbono neutral.

- **Factor de energía renovable (REF)**

El REF mide la proporción de energía renovable que un centro de datos genera o controla en comparación con su consumo total de energía. Este indicador es independiente del tamaño del centro, lo que lo convierte en una herramienta útil para comparar diferentes instalaciones. Un REF de 1.0 indica que el centro de datos utiliza exclusivamente energía renovable. Esta métrica ayuda a los operadores a monitorear su transición hacia energías limpias, incluso cuando las demandas de carga del centro cambian.

- **Factor de reutilización de energía (ERF)**

El ERF evalúa la proporción de energía reutilizada frente al consumo total del centro de datos, con valores que van de 0 (sin reutilización) a 1,0 (toda la energía reutilizada o exportada). Un ejemplo práctico es el uso del calor residual en sistemas de calefacción urbana, como el implementado en el centro de datos de Facebook en Odense, Dinamarca [17].

Este indicador promueve que los operadores y las comunidades locales busquen formas innovadoras de reutilizar la energía excedente, como alimentar redes de calefacción. Estas iniciativas no solo reducen el desperdicio energético, sino que también aportan beneficios ambientales y económicos, al conectar los centros de datos con las necesidades de energía térmica de las ciudades cercanas.

2.5.2.2 Emisiones de gases Greenhouse

El CO_2 y otros gases como el metano (CH4), los perfluorocarbonos (PFC) y los hidrofluorocarbonos (HFC) se clasifican como gases GEI. Estos gases, conocidos comúnmente como emisiones de carbono, son factores clave que contribuyen al cambio climático, uno de los mayores desafíos actuales. Registrar estas emisiones permite a los operadores de centros de datos demostrar sus esfuerzos por mitigar el cambio climático. Como métricas más representativas tenemos:

- **Emisiones de GEI (directas)**

Son aquellas que se generan de fuentes que pertenecen al centro de datos o están bajo su control. Incluyen emisiones de generadores de respaldo, fugas de gases refrigerantes como el hexafluoruro de azufre (SF6) o hidrofluorocarburos (HFC), y combustibles fósiles utilizados en transporte y maquinaria.

Monitorear y reducir estas emisiones es clave para implementar mejoras operativas, considerando alternativas como el almacenamiento de energía para reemplazar generadores diésel.

- **Emisiones de GEI basadas en la ubicación y en mercado (indirectas)**

Se dividen en dos métricas:

Basadas en la ubicación: reflejan las emisiones promedio de las redes eléctricas en la región donde opera el centro de datos.

Basadas en el mercado: consideran contratos específicos para adquirir energía, como fuentes renovables.

Estas métricas evalúan las emisiones generadas por la electricidad, el calor o la refrigeración adquiridos. Ayudan a identificar oportunidades de mitigación, como cambiar a fuentes de energía renovable, y a analizar riesgos asociados con las redes locales o los acuerdos contractuales. Ambas métricas son útiles para estrategias de sostenibilidad y reducción del carbono.

- **Adecuación de suministro y consumo hora por hora**

La métrica evalúa el grado en que la generación de energía renovable se alinea con el consumo energético de un centro de datos en tiempo real. Empresas líderes como *Microsoft* y *Google* están experimentando con este concepto.

Su propósito es ofrecer mayor transparencia sobre la relación entre la producción de energía renovable y el consumo, con el objetivo de lograr una coincidencia del 100% entre ambas, hora por hora.

2.5.2.3 Agua

Las técnicas de enfriamiento evaporativo, como las torres de refrigeración, son populares debido a su alta eficiencia en la gestión del calor. Sin embargo, estas tecnologías requieren grandes cantidades de agua, un recurso limitado, especialmente en zonas con estrés hídrico. Además, la generación de energía convencional consume aún más agua que la empleada en los centros de datos. El uso de agua reciclada en lugar de agua potable ayuda a aliviar la presión sobre los recursos locales. Las métricas utilizadas son:

- **Uso total de agua del sitio**

Esta métrica mide el uso total de agua en el funcionamiento del centro de datos, incluyendo extracción, evaporación y descarga. La integración de agua regenerada, como en el sistema de distribución de *Loudoun Water*, es una solución efectiva para reducir el uso de agua potable.

Prever el consumo de agua desde la fase de diseño permite implementar tecnologías de enfriamiento más eficientes, como enfriadores por aire en lugar de enfriadores por agua, adoptados por centros de datos como *Vantage*. Monitorear el consumo durante las operaciones permite identificar fugas y establecer bases para mejoras continuas en la gestión del agua.

- **Consumo total de agua de la fuente de energía**

Se refiere al agua utilizada para producir la electricidad que alimenta a un centro de datos, principalmente en las plantas de energía de las empresas de servicios públicos. Esta métrica evalúa el uso indirecto de agua vinculado al consumo de energía. Los operadores pueden usarla para seleccionar fuentes de energía que optimicen el uso de agua.

Un sistema de enfriamiento evaporativo en el centro de datos reduce el consumo energético, lo que a su vez disminuye el uso de agua en la generación de electricidad, equilibrando ambos factores.

2.5.2.4 Residuos

Los centros de datos generan residuos significativos en su construcción y operación. Reducir los desechos, reutilizarlos o reciclarlos es esencial para la sostenibilidad. Estrategias como la economía circular ayudan a mejorar en este aspecto, y la notificación de residuos será cada vez más relevante. Las métricas utilizadas son las siguientes:

- **Desperdicio total generado**

Peso total de los residuos de material generados en un centro de datos. La medición de esta métrica mide el peso de los residuos desde la construcción hasta el final de la vida útil del centro de datos. Los desechos se clasifican por fase y periodo, considerando tanto los directos como los de la cadena de suministro.

Cuantificar los residuos ayuda a identificar impactos ambientales y promover la minimización de desechos. A medida que mejore el reporte, se integrará mejor la generación indirecta.

- **Residuos depositados en vertederos**

Esta métrica mide el peso total de los residuos que terminan en vertederos. Sirve para rastrear el volumen de desechos enviados a vertederos y diseñar programas para reducir esta cantidad.

- **Residuos desviados**

Se refiere al peso de los residuos que se desvían de los vertederos mediante estrategias de economía circular, como reutilización o reciclaje. Equipos que ya no cumplen su propósito, como las baterías de UPS al final de su vida útil, pueden reciclarse o reacondicionarse para otros usos.

Esta métrica monitorea los esfuerzos de reciclaje y fomenta la creación de programas para aumentar la cantidad de desechos desviados.

- **Tasa de desviación de residuos**

Es la proporción entre los residuos reciclados y el total de residuos generados en un centro de datos.

Este indicador permite realizar comparaciones entre diferentes centros de datos y desarrollar estrategias de mejora con el objetivo de alcanzar el 100% de residuos reciclados. La práctica de economía circular asociada es fundamental para lograr objetivos de cero residuos.

2.5.2.5 Tierra y biodiversidad

Los centros de datos afectan directamente la tierra donde se construyen y, de forma indirecta, la de su cadena de suministro. Aunque tienen una huella menor que los edificios de oficinas, aquellos con parques solares o eólicos pueden tener un impacto significativo en la biodiversidad. Medir estos impactos, común en industrias como la minería, es una práctica nueva en los centros de datos. Las métricas relacionadas ayudan a establecer objetivos ambientales y monitorear progresos anuales en sostenibilidad. La métrica utilizada es la siguiente:

- **Abundancia media de especies (MSA)**

Desarrollada por *CDC Biodiversité*[32] en Francia, esta métrica mide el impacto de los centros de datos en la biodiversidad global. Aunque no es un estándar formal, busca ser una herramienta clave para monitorear y reportar sostenibilidad ambiental.

Proporciona directrices para integrar la biodiversidad en los informes de sostenibilidad.

A lo largo de este trabajo, se ha destacado la importancia de incorporar criterios de sostenibilidad en el diseño y operación de centros de CPD, considerando su papel estratégico en el ámbito digital y su impacto significativo en el medio ambiente. Si bien en los capítulos anteriores se han abordado conceptos generales y enfoques teóricos, es fundamental contar con herramientas prácticas que permitan evaluar de manera concreta el desempeño sostenible de estas instalaciones.

En el Anexo II (Métricas de sostenibilidad para aplicar en un CPD), se han reflejado un cuadro resumen las métricas de sostenibilidad aplicables a los CPD. Dichas métricas abarcan aspectos clave como el consumo energético, la eficiencia hídrica, la gestión de residuos y las emisiones de gases de efecto invernadero, entre otros. Este compendio proporciona una base práctica y estructurada para la implementación de estrategias sostenibles en proyectos y operaciones de CPD.

[32] *CDC Biodiversité* es una empresa privada cuya actividad se dedica íntegramente al diseño e implementación de acciones concretas para la restauración y preservación de la biodiversidad, y su gestión sostenible.

3 IMPLEMENTACIONES A REALIZAR EN CPD SOSTENIBLE

3.1 Eficiencia energética

La implementación de tecnologías de eficiencia energética en los CPD es uno de los mayores asuntos a tener en cuenta ya que el funcionamiento constante del mismo requiere del uso de mucha energía lo que genera importantes impactos en el ambiente y en la economía. Este capítulo analizará el estado actual de consumo de electricidad de los CPD considerando los indicadores claves de eficiencia y propone las medidas al respecto enfocándose en que sea sostenible.

3.1.1 Consumo energético

Los CPD son fundamentales para la infraestructura digital moderna, pero también constituyen una fuente significativa de consumo energético. A medida que crecen las demandas de *cloud computing, IA* y *el IoT*, el impacto de los CPD en el consumo global de electricidad se vuelve cada vez más relevante. Este incremento plantea desafíos importantes en términos de sostenibilidad y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

3.1.1.1 Consumo energético global

A nivel mundial, el consumo de energía de los CPD se ha convertido en una preocupación conforme la infraestructura digital continúa expandiéndose. A pesar de los avances en eficiencia energética, el rápido crecimiento en el uso de tecnologías como el *big data, machine learning* y la virtualización ha incrementado la demanda de procesamiento de datos rápida y exponencialmente. La AIE estimó que, mientras que el consumo de energía de los CPD se ha mantenido relativamente estable durante la última década gracias a mejoras en eficiencia y consolidación de datos, el incremento en el tráfico de internet y los servicios en la nube está ejerciendo una presión creciente sobre la infraestructura. Por ejemplo, la adopción de centros de datos hiperescala, instalaciones que hospedan miles de servidores y gestionan volúmenes masivos de datos, se ha elevado considerablemente durante los últimos años. No solo consumen energía para el procesamiento de datos, sino también para el abastecimiento, ya que cuentan con sistemas de refrigeración que mantienen los equipos seguros. Según Greenpeace [18], la refrigeración es uno de los mayores contribuyentes al consumo energético de un CPD, llegando a ser hasta el 40% del consumo total en algunas instalaciones.

3.1.1.2 Situación en España

Uno de los principales factores que aumentan la importancia de este fenómeno en España es el consumo energético de los CPD, que es especialmente notable en el país. Según los informes del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [19], los CPD implican entre 2% y 3% de la

cantidad total de electricidad utilizada en el país. Comparativamente, esa cantidad es la que se utiliza para abastecer a ciudades medianas. Este problema se puede atribuir al aumento de desarrollo de infraestructuras de telecomunicaciones, el aumento de uso de los servicios de almacenamiento en la nube y la inteligencia artificial y análisis de grandes datos en todas las esferas de la economía.

Además, España está convirtiéndose en uno de los principales *hubs* para CPD en Europa. Dado que muchas de las conexiones de España con otros continentes pasan por su territorio, la creación de nuevos centros en el territorio del país se convierte en una tendencia. Al mismo tiempo, es un desafío en cuanto a la capacidad de España para abastecer de energía limpia a todos estos centros y evitar las emisiones asociadas.

3.1.1.3 Desafíos y futuro del consumo energético

Hay una pregunta clave sobre la sostenibilidad adecuada de los CPD, que radica en el equilibrio entre la capacidad y la eficiencia energética. Dado que la demanda de procesamiento de datos y centros de almacenamiento sigue creciendo, también lo hace el consumo de energía. Esto, a su vez, resulta en un aumento en la emisión de dióxido de carbono, que contradice los objetivos de sostenibilidad globales.

Entre las estrategias para enfrentar estos desafíos, se encuentran:

- **Optimización de la eficiencia energética:** la identificación de la gestión energética es otro de los diversos métodos para hacer que los centros de datos sean más ecológicos. Intentando tecnologías como servidores de baja energía, sistemas de enfriamiento mejorados como *el free cooling* y algoritmos de gestión de carga que disminuyan la necesidad de energía en horas de actividad limitada.
- **Transición a energías renovables**: también es una opción popular y se aplica cada vez más en varias instalaciones. En España, por ejemplo, se implementan y utilizan soluciones solares y eólicas en los centros de datos para disminuir la dependencia de energías “normales”. Según Telefónica; la gran empresa española ya está instalando generadores de energía solar en sus centros de datos para disminuir la necesidad de la energía normal.
- **Reciclaje de calor residual**: una fuente emergente y ecológica de energía es un reciclaje de calor, y se aplica en algunos centros de datos. Cuando los servidores se calientan, producen calor; en lugar de extinguirlo y enfriar los servidores una vez más, este calor puede usarse en otras áreas. Por ejemplo, se puede usar para calentar los edificios cercanos al centro de datos.

La creciente demanda global de datos y servicios tecnológicos plantea cuestiones sobre la sostenibilidad a largo plazo en cuanto a los CPD. La necesidad de buscar soluciones más extraordinarias para disminuir el impacto de estos en el medio ambiente sigue siendo una preocupación entre las tecnológicas y los responsables de las políticas energéticas.

3.1.2 Indicadores clave de eficiencia energética (PUE, WUE, DCiE)

En los CPD, es fundamental medir y optimizar la eficiencia energética para reducir su impacto en el medio ambiente y los costes operacionales asociados al consumo de energía. Para este fin, se han desarrollado diferentes indicadores clave para evaluar el desempeño energético y la sostenibilidad de estas infraestructuras. Algunos de los indicadores más recurrentes son *Power Usage Effectiveness, el Water Usage Effectiveness y el Data Center Infrastructure Efficiency*. Debido a su popularidad y capacidad para identificar las áreas de oportunidad que permiten fomentar las mejores prácticas en diseño y operación de CPD, se determina abordar el análisis de estos indicadores.

3.1.2.1 Power Usage Effectiveness (PUE)

El *PUE* es el indicador más utilizado a nivel global para evaluar la eficiencia energética de un CPD. Fue desarrollado por el *Green Grid* [20], consorcio de empresas del sector de data centers que promueve la sostenibilidad en los CPD. El PUE mide la relación entre la energía total consumida por el CPD y la energía utilizada específicamente por los *equipos de TI* (servidores, sistemas de almacenamiento, dispositivos de red). La fórmula para calcular el PUE es la siguiente:

$$PUE = \frac{Energía\ Total\ consumida\ por\ el\ CPD}{Energía\ Consumida\ por\ los\ Equipos\ de\ TI}$$

Un valor de PUE ideal es cercano a 1, significa que casi toda la energía que llega al CPD se aprovecha para operar los equipos de TI. Considerando la eficiencia de un CPD, el PUE tenderá al 1, mientras que cualquier valor superior a 2 o 3 reflejará lo que una parte sustancial de la energía se pierde en subsistemas alternativos como el calentamiento o la iluminación.

Según *Uptime Institute* [21], la media global de PUE asciende a 1,58. Esto que significa que, en promedio, por cada kWh consumido por los equipos de TI, el CPD consume un 58% adicional en otros sistemas de soporte. Este indicador es clave para los operadores de CPD, ya que permite identificar oportunidades para reducir el consumo energético de sistemas auxiliares como refrigeración y fuentes de alimentación

3.1.2.2 Water Usage Effectiveness (WUE)

El *WUE* mide la eficiencia en el uso de agua dentro de un CPD, y es de vital importancia en centros que usan sistemas de refrigeración por evaporación u otras tecnologías que gastan considerables cantidades de agua. El WUE se calcula dividiendo la cantidad total de agua utilizada por el CPD entre la cantidad de energía consumida, es decir que su fórmula es la siguiente:

$$WUE = \frac{Agua\ Utilizada}{Energía\ Consumida\ (kWh)}$$

Debido a que los recursos del aguan en determinados lugares del mundo, es un problema, el WUE permite a los responsables del CPD, adoptar medidas para disminuir este consumo, como, por ejemplo, implementar sistemas de refrigeración adiabática o reutilizar el agua para la refrigeración. *Water Usage Effectiveness,* señala *Green Grid* [20], permite a los centros de datos usar conscientemente los recursos naturales, especialmente si estos recursos son limitados.

3.1.2.3 Data Center Infrastructure Efficiency (DCiE)

La tecnología de interconexión de centros de datos (DCiE) es otro indicador utilizado para determinar la eficiencia general de un CPD. Es simplemente el inverso de la definición de PUE y se calcula de la siguiente manera:

$$DCiE = \frac{EnergíaUtilizada\ por\ los\ Equipos\ de\ TI}{Energía\ Total\ Consumida\ por\ el\ CPD}\ x\ 100$$

Dada esta fórmula, DCiE se expresa comúnmente como un porcentaje. Esto significa que cuanto mayor sea, mejor será el CDF en términos de eficiencia. Se dice que el DCiE perfecto igual a 100% indica correctamente que toda la electricidad que se envía al centro de datos se utiliza para alimentar directamente los equipos de TI. DCiE también se mide en términos inversos y es una métrica complementaria clave para PUE, y básicamente ofrece la visión especular de la misma.

3.1.2.4 Retos y tendencias en la mejora de la eficiencia energética

Estos indicadores se han generalizado en el desafío fundamental para la industria en reducir el PUE y el WUE sin sacrificar la disponibilidad y el rendimiento del centro de datos.

Por otro lado, el aumento en la conciencia de la sostenibilidad ha llevado a una mayor atención al WUE. El consumo de agua eficiente y la refrigeración líquida o adiabática no solo reducen la utilización de energía, sino que también minimizan el impacto de la huella hídrica.

3.1.3 Estrategias de optimización energética

Existen múltiples estrategias para mejorar la eficiencia energética [22] en los CPD, desde la optimización de la infraestructura física hasta la gestión avanzada de cargas de trabajo. A continuación, se presentan algunas de las principales estrategias utilizadas en España y a nivel global.

3.1.3.1 Optimización de la distribución de energía

Optimizar la distribución de energía dentro del CPD es esencial para reducir las pérdidas y aumentar la eficiencia. Algunas de las estrategias que se utilizan incluyen:

- **Sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) eficientes:** los UPS modernos son capaces de reducir las pérdidas de energía y mejorar la eficiencia general del CPD.
- **Sistemas de gestión de energía inteligente:** los CPD pueden emplear sistemas de gestión energética que ajusten el consumo en función de la carga de trabajo, lo que permite ahorrar energía durante los periodos de baja demanda.

3.1.3.2 Gestión eficiente de la carga de trabajo y virtualización

La virtualización es una tecnología clave para mejorar la eficiencia energética de los CPD, ya que permite utilizar menos servidores físicos para realizar la misma cantidad de trabajo. A través de la consolidación de servidores y la asignación dinámica de recursos, los CPD pueden reducir el consumo energético y mejorar la eficiencia operativa.

Además, la *gestión dinámica de la carga de trabajo* permite equilibrar las cargas en función de la demanda en tiempo real. Esto puede incluir la migración de tareas entre servidores o incluso entre diferentes CPD para aprovechar las horas de menor demanda energética o para usar fuentes de energía más limpias en ciertos momentos.

3.1.4 Sistemas de refrigeración tradicionales

En un CPD, el control de la temperatura es crucial para garantizar que los equipos funcionen de manera adecuada y eficiente.

A continuación, se exponen los principales sistemas de refrigeración tradicionales [23] empleados, sus ventajas, desventajas y una comparativa para determinar cuál podría ser la mejor opción dependiendo de las necesidades y recursos disponibles.

3.1.4.1 Refrigeración por Aire

Este es el método tradicional y más común. Su funcionamiento se basa en enfriar el aire que rodea los equipos para disipar el calor generado.

- **Cómo funciona:** se emplean unidades de aire acondicionado diseñadas para salas técnicas (CRAC). Estas envían aire frío a través de conductos o rejillas en el piso para mantener los equipos a la temperatura adecuada.
- **Ventajas:**
    - Instalación sencilla.
    - Costo inicial accesible.
    - Bajo nivel de especialización para el mantenimiento.

- **Inconvenientes:**
    - Menor eficiencia en espacios con alta densidad de equipos.
    - Consumo energético elevado.
    - El flujo de aire puede perder efectividad en ciertos puntos de la sala.
- **Eficiencia y costos:**
    - Eficiencia promedio: relativamente baja, con un PUE de 1.8 a 2.5.
    - Costos: asequibles al inicio, pero con gastos operativos elevados por el consumo constante de electricidad.

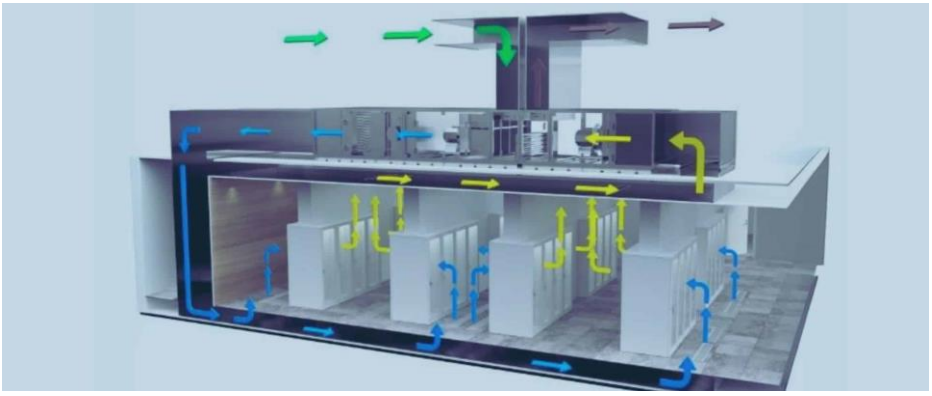


Figura 3-1 Refrigeración tradicional (Fuente: Prointer. Climatización y energía) [24]

- **Componentes clave:**
    - Ventiladores de alta eficiencia.
    - Filtros Ultra Low Penetration Air (ULPA)[33] o *High Efficiency Particle Air* (HEPA)[34].
    - Disipadores de calor de cobre o aluminio.
    - Unidades de tratamiento de aire (UTAs) con control de humedad.

3.1.4.2 Refrigeración líquida indirecta. mayor eficiencia y flexibilidad

Este enfoque utiliza un líquido refrigerante para absorber el calor de los equipos y trasladarlo a un intercambiador de calor remoto.

- **Cómo funciona:** se instalan tuberías que llevan el líquido a dispositivos de enfriamiento colocados cerca de los racks o dentro de ellos.
- **Ventajas:**
    - Mayor capacidad de enfriamiento en espacios reducidos.
    - Menor necesidad de mover aire caliente.

[33] *ULPA:* filtro para partículas ultra pequeñas en aire, que puede eliminar del aire al menos el 99,999% del polvo, polen, moho, bacterias y cualquier otra partícula en el aire con un tamaño mínimo de penetración de partículas de 100 nanómetros. Tienen una eficacia del 99,999 % en la eliminación de partículas submicrónicas de 0,12 micrones de diámetro o más.

[34] *HEPA:* filtro que puede retirar la mayoría de partículas perjudiciales, incluyendo las esporas de moho, el polvo, los ácaros del polvo, la caspa de mascotas y otros alérgenos irritantes del aire. Tienen una eficacia del 99,97 % en la eliminación de partículas de 0,3 micrones de diámetro o más.

- **Inconvenientes:**
    - Infraestructura más compleja.
    - Riesgo de fugas.
    - Requiere personal especializado para su mantenimiento.
- **Eficiencia y costos:**
    - Eficiencia promedio: mejor que el aire, con un PUE entre 1.4 y 1.7.
    - Costos: Inversión inicial moderada, pero un balance aceptable entre costos operativos y resultados.

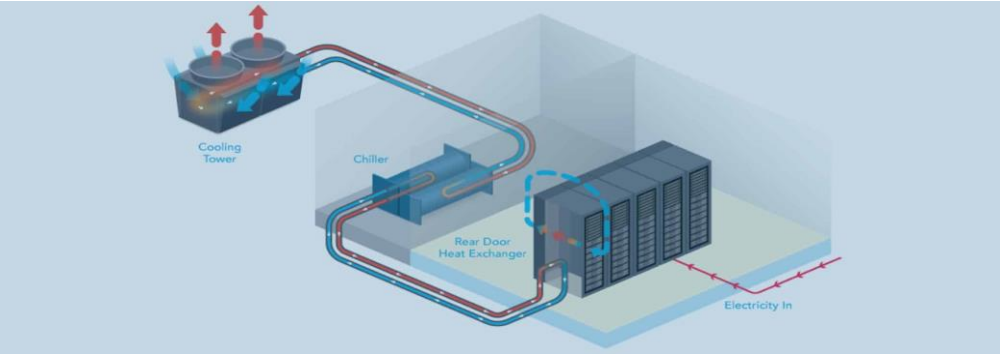


Figura 3-2 Refrigeración líquida indirecta (Fuente: Prointer. Climatización y energía) [24]

- **Aplicaciones:**
    - Grandes CPD: ideal para instalaciones con densidades de potencia que superan los 6-15 kW/m², donde la eficiencia energética y el espacio son consideraciones críticas.
    - CPD con restricciones de espacio: cuando las densidades de potencia alcanzan los 10-20 kW/m², la refrigeración líquida indirecta maximiza el uso eficiente del espacio.

3.1.4.3 Refrigeración líquida directa

En este caso, el líquido refrigerante se aplica directamente sobre los componentes críticos, como procesadores o memorias, para disipar el calor de manera más eficiente.

- **Cómo funciona:** se utilizan fluidos dieléctricos, que no conducen electricidad, para enfriar directamente las partes que generan más calor.
- **Ventajas:**
    - Altísima capacidad de enfriamiento.
    - Permite reducir o eliminar el uso de sistemas de aire acondicionado.
    - Ideal para equipos con alta densidad de energía.
- **Inconvenientes:**
    - Alto costo de instalación.
    - Infraestructura compleja.
    - Requiere adaptaciones especiales en los equipos.

- **Eficiencia y costos:**
  - Eficiencia promedio: muy alta, con un PUE entre 1.1 y 1.4.
  - Costos: elevados al inicio, pero operativamente eficientes.

Aplicaciones:

- Supercomputadoras: ideal para densidades de potencia superiores a los 20 kW/m², donde se requiere una disipación de calor extremadamente eficiente.
- Centros de investigación: instalaciones con equipos especializados que demandan condiciones de refrigeración muy precisas. Estos entornos con densidades de potencia que pueden superar los 30-40 kW/m² se benefician de la refrigeración líquida directa.

Sistema	Facilidad de Instalación	Costos Iniciales	Costos de Operación	Densidad de Enfriamiento	Eficiencia Energética (PUE)
Refrigeración por Aire	Alta	Baja	Alta	Baja	1,8 – 2,5
Refrigeración Líquida Indirecta	Media	Media	Media	Media-Alta	1,4 – 1,7
Refrigeración Líquida Directa	Baja	Alta	Baja	Muy Alta	1,1 – 1,4

Tabla 3-1. Comparación de los diferentes sistemas de refrigeración [23]

3.1.4.4 Consideraciones para la elección del sistema de refrigeración

Cada sistema tiene sus ventajas y desventajas, por lo que su elección dependerá de las necesidades específicas del CPD y de los recursos disponibles:

- **Refrigeración por Aire:** buena para proyectos con presupuesto limitado y densidades bajas.
- **Refrigeración Líquida Indirecta:** ideal para equilibrar costos y eficiencia en espacios de densidad moderada.
- **Refrigeración Líquida Directa:** la mejor opción para CPD con alta densidad de calor y enfoque en eficiencia energética.

3.1.4.5 Comparativa de costos y eficiencia operativa

Sistema	Costo de inversión (€/kW)	Costo de operación anual (€/kW)
Refrigeración por aire	50-150	10-20
Refrigeración líquida indirecta	100-300	5-15
Refrigeración líquida directa	200-500	3-10

Tabla 3-2. Costo según tipo de refrigeración en CPD [23]

Los costos de instalación y operación varían según el tamaño del CPD, la ubicación geográfica y las tecnologías utilizadas. Los costos operativos también dependen del consumo energético, por lo que es importante realizar un análisis exhaustivo antes de tomar una decisión.

La decisión final debe basarse en una evaluación detallada de los costos, la eficiencia esperada y las limitaciones específicas de cada situación.

3.1.5 Optimización de los sistemas de climatización sostenibles HVAC

Los sistemas de climatización *HVAC* son fundamentales en el funcionamiento de un CPD. En un CPD, los equipos emiten una cantidad considerable de calor que debe ser controlado para evitar daños y garantizar el funcionamiento adecuado. Por otro lado, la climatización es una de las principales fuentes de consumo de energía en un CPD, lo que hace que su optimización sea fundamental en la mejora de la sostenibilidad de las instalaciones.

A continuación, se describen las principales estrategias y tecnologías más actuales y sostenibles para la *optimización de los sistemas de HVAC*

3.1.5.1 Free cooling

El *free cooling*, o enfriamiento gratuito, es una de las estrategias más eficientes en la climatización de CPD sostenibles. Consiste en enfriar el aire que circula por el CPD aprovechando las bajas temperaturas del exterior, lo cual reduce considerablemente el uso de sistemas de refrigeración mecánicos. El enfriamiento gratuito es más eficiente en climas fríos o templados y puede ser complementado con sistemas mecánicos en caso de que la temperatura exterior no sea lo suficientemente baja.

Clima	Ahorro Energético (%)
Clima frío	30-40%
Clima templado	15-20%
Clima cálido	5-10%

Tabla 3-3. Potencial de ahorro energético con sistemas de free cooling en diferentes climas [21]

Según un estudio del *Instituto Uptime* [21], el uso del *free cooling* puede ahorrar entre el 30% y el 40% en climas fríos y hasta el 15% en climas templados. Se trata de una solución de ahorro energético que no solo reduce los costes de energía sino también los costes operativos y las emisiones de gases de efecto invernadero.



Figura 3-3 Free cooling para CPD (Fuente: Empresa AERMEC) [25]

3.1.5.2 Refrigeración adiabática

La *refrigeración adiabática* es otra técnica eficiente utilizada en CPD sostenibles. Funciona mediante la evaporación de agua para enfriar el aire que circula en el CPD, esto permite disminuir la temperatura sin necesidad de compresores o sistemas mecánicos clásicos de alto consumo energético. Esta técnica es altamente eficiente en climas secos, donde la evaporación del agua es más efectiva.

Un estudio de *Green Grid (2020*) [20], mostró que la refrigeración adiabática puede reducir el consumo energético de la climatización en hasta un **50%** en comparación con los sistemas de refrigeración por compresión tradicionales. Además, es una solución más sostenible ya que utiliza menos energía y agua.

Sistema de Climatización	Consumo Energético (kWh por rack al año)	Ahorro Energético (%)
Refrigeración tradicional	2.000	-
Refrigeración adiabática	1.000	50%

Tabla 3-4. Comparativa de consumo energético [20]

3.1.5.3 Aislamiento del Aire (Containment Systems)

Los sistemas de *containment systems* o aislamiento de aire es un tipo de tecnología de diseño que permite una mayor eficiencia de los sistemas mecánicos de HVAC al aislar el aire caliente generado por los servidores del aire frío que se utiliza para enfriarlos en el CPD

Se pueden clasificar en dos tipos:

- ***Cold aisle containment*:** en este sistema, se aísla el *pasillo frío*, es decir, el espacio por donde circula el aire frío hacia los equipos.
- ***Hot aisle containment*:** aquí, se aísla el *pasillo caliente*, donde se concentra el aire caliente expulsado por los equipos.

Según un estudio de ASHRAE[35] [23], este tipo de sistemas puede mejorar la eficiencia de los sistemas de climatización de un CPD en hasta un 20% al hacer más eficiente el uso del aire frío en su proceso de enfriamiento.

Sistema HVAC	Eficiencia Energética Mejorada (%)
Sin containment	-
Cold aisle containment	10-15%
Hot aisle containment	15-20%

Tabla 3-5. Comparación entre un sistema de HVAC [26]

[35] Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado.

3.1.5.4 Uso de sensores y gestión inteligente de energía

La implementación de *sensores y sistemas de gestión de energía inteligente* en combinación con los sistemas HVAC puede ser más eficiente en la naturalización del centro de datos de acuerdo con el uso real. Es posible que los sensores de temperatura y humedad detecten el cambio de condición en el entorno e inyecten los sistemas de enfriamiento sin usar más energía. Controlar el trabajo para que los sistemas automáticos secuencie el ciclo de enfriamiento y ajuste de temperatura según la carga.

Según un informe del *Uptime Institute (2020)* [21], los centros de datos con el sistema de gestión de energía pueden ahorrar hasta un 15% de energía en función de la mejora operativa y la sostenibilidad general.

3.1.5.5 Aprovechamiento del calor residual

Una alternativa innovadora para promover la sostenibilidad en los centros de datos es aprovechar el calor residual generado por la operación de su infraestructura física, como servidores y equipos de TI. En lugar de desperdiciarlo, este calor puede ser reutilizado en otros lugares.

Un ejemplo destacado es su uso para alimentar redes de calefacción en áreas urbanas o industriales. Países como Suecia y Dinamarca [26] ya han implementado soluciones en centros de datos sostenibles que canalizan este calor sobrante para calentar viviendas durante el invierno, optimizando recursos y reduciendo el impacto ambiental. Estas iniciativas demuestran cómo el reciclaje de calor residual puede integrarse en modelos de economía circular, beneficiando tanto al medio ambiente como a las comunidades locales

3.1.6 Nuevas tecnologías para la reducción del consumo energético

La innovación tecnológica juega un papel central en la evolución hacia CPD más eficientes y sostenibles. Algunas de las tecnologías emergentes incluyen:

- **IA para la optimización energética:** la IA puede ayudar a gestionar el consumo energético de manera más eficiente, ajustando los parámetros operativos en tiempo real para optimizar el uso de energía. Google ha implementado IA en sus CPD, logrando una reducción del 30% en el uso de energía destinado a la refrigeración (Google Cloud, 2021).
- **Almacenamiento energético y micro-redes:** la combinación de almacenamiento en baterías y la integración con micro-redes locales permite a los CPD aprovechar al máximo las energías renovables y reducir la dependencia de fuentes de energía no sostenibles.

3.2 Diseño de las infraestructuras

3.2.1 Materiales y construcción ccológica

La construcción de CPD sostenibles depende de una selección rigurosa de *materiales ecológicos* [27] y el empleo de prácticas de construcción sostenibles. En todos los CPD se debe reducir el impacto ambiental en el ciclo de vida del CPD, desde la construcción hasta la explotación y desmantelamiento regulares. Así, la selección de materiales con un impacto ambiental limitado, así como la selección de prácticas de construcción sostenibles, el uso de materiales reciclados o renovables, puede reducir significativamente los recursos utilizados y las emisiones de gases de efecto invernadero y asegurar que el edificio cumpla con la legislación medio ambiental y con los objetivos de sostenibilidad de las empresas.

3.2.1.1 Uso de Materiales Reciclados y Renovables

En una de las esferas más estratégicas para la disminución de la huella del carbono y la reducción de impacto ambiental al diseñar un CPD es el uso de materiales reciclados o de origen renovable. Los materiales reciclados, como el hormigón reciclado o los metales reutilizados, reducen la demanda de recursos naturales vírgenes y la cantidad de residuos que se generan en el proceso de construcción

La *madera certificada*, como la utilizada por el *Forest Stewardship Council (FSC)*[36], es uno de los materiales más importantes en la construcción ecológica, pues la selección de la materia prima de origen sustentable disminuye la dependencia de los materiales con emisiones de CO_2 en el proceso de producción, como el acero o el hormigón convencional. Un estudio del *US Green Building Council* (2020) [28] muestra que el uso de materiales reciclados y renovables en la construcción de edificios puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% a lo largo del ciclo de vida del edificio.

3.2.1.2 Materiales con baja huella de carbono

Los materiales con baja huella de carbono son imprescindibles, ya que los materiales son la principal fuente de emisión. Algunos ejemplos en este sentido incluyen *hormigón de baja emisión*, es decir, que utiliza una menor cantidad de cemento, o que combina la ceniza volante o la escoria granulada de alto horno, ya que estos materiales son responsables de la mayor cantidad de CO_2 liberado en su producción. Además, es la energía térmica utilizada en el edificio.

El uso de aislamiento térmico de alto rendimiento como los paneles de espuma rígida reciclada y el aerogel permite la eficiencia energética de los CPD, ya que disminuye la necesidad de calefacción o refracción. Esto se debe a que su uso mejorará la eficiencia energética del edificio, lo que disminuirá en gran medida la demanda de energía.

3.2.1.3 Certificaciones de construcción sostenible

Además, obtener certificaciones de construcción sostenible, como la *LEED* y el *BREEAM*, garantiza que el CPD cumpla apropiadamente con los estándares de sostenibilidad. Éstos alientan el uso de materiales ecológicos, implementan prácticas de gestión de residuos en la construcción y fomentan la eficiencia energética.

A través de la reducción del uso de materiales de impacto ambiental, instalación de sistemas sostenibles de reciclaje y la disminución del desperdicio en la construcción, un CPD que posea la certificación de LEED ya registraría un ahorro en energía y menores residuos generados por el proceso de construcción.

3.2.1.4 Durabilidad y ciclo de vida de los materiales

La elección de materiales con una vida útil prolongada es fundamental, ya que reduce la necesidad de mantenimiento y reemplazo, lo que a su vez reduce los recursos consumidos y los residuos producidos. Los materiales que tienen larga durabilidad incluyen *acero inoxidable* y *aluminio anodizado*, que también se pueden reciclar fácilmente una vez que el edificio ha alcanzado el final de su vida útil.

El ACV[37] es una herramienta utilizada para evaluar el impacto ambiental de los materiales, desde su emisión hasta su eliminación adecuada. Según el *Uptime Institute* [29], el uso de un enfoque basado en el ciclo de vida para seleccionar materiales para compañías de centros de datos puede ayudar a reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero y hacer que la huella ecológica del proyecto sea más limpia.

3.2.1.5 Uso de tecnologías de construcción limpia

Además de los materiales, las técnicas de construcción limpia, también juegan un papel importante en la sostenibilidad de un CPD. La idea de construcción limpia se trata de reducir las máquinas contaminantes en la medida de lo posible, reducir el desperdicio de materiales y, en general, optimizar

[36] Sistema mundial de certificación forestal establecido para bosques y productos forestales.

[37] Análisis del Ciclo de Vida. Metodología que permite, de manera objetiva, estimar y evaluar los impactos que un producto o servicio puede tenr sobre el medio ambiente durante todas las etapas de su vida.

los procesos de construcción de manera que puedan hacerse más eficientes. Por ejemplo, la prefabricación implica que muchas de las partes grandes del edificio se produzcan en fábricas controladas. Esto mejora drásticamente el impacto en el ambiente en términos de desperdicio y contaminación.

Según el *Green Building Council* [28], la construcción prefabricada puede reducir el desperdicio de materiales hasta en un 50%, mejorando dramáticamente la eficiencia de los proyectos en términos de tiempo y recursos. La prefabricación también permite el uso de componentes modulares que son fáciles de ensamblar y mantener durante el ciclo de vida del edificio.

3.2.2 Ubicación y entorno del CPD

La ubicación y el entorno de un CPD tienen una gran influencia en su sostenibilidad. Una elección estratégica de su ubicación puede reducir significativamente el impacto ambiental, aumentar su eficiencia energética, reducir los costes de funcionamiento y hacer que el CPD sea más resistente a las condiciones cambiantes del clima.

A continuación, se presentan algunos de los factores clave para tener en cuenta al elegir la ubicación y el entorno de un CPD sostenible.

3.2.2.1 Clima y recursos naturales.

El clima de la zona donde se ubica el CPD es uno de los factores más cruciales de su sostenibilidad. Elegir un área con clima más frío conlleva a una placa de refrigeración más baja, lo que se traduce en menor consumo energético. El *free cooling* es mucho más eficiente en un área con temperaturas más bajas durante la mayor parte del año. Por ejemplo, Google ha construido CPD en Finlandia y otras áreas del norte de Europa que utilizan el aire frío del exterior para enfriar sus servidores, lo que conduce a una mayor eficiencia energética.

Ubicación	Temperatura Promedio Anual (°C)	Ahorro Energético Potencial (%)
Norte de Europa	5-10	40-50
Norte de Estados Unidos	10-15	30-40
Sur de Europa	15-20	10-20

Tabla 3-6. Ahorro energético potencial al implementar free cooling en diferentes climas [21]

3.2.2.2 Proximidad a fuentes de energía renovable

Otro factor clave a considerar al seleccionar la ubicación del CPD sostenible es la proximidad a las fuentes de energía renovable. Los CPD que se instalan cerca de una planta solar, eólica o hidroeléctrica pueden recibir energía renovable de estas fuentes y disminuir su huella de carbono. Dado que España posee alta energía solar, el país es una ubicación adecuada para la construcción de un CPD que utilizará energía renovable para alimentarse.

Un ejemplo es el centro de datos de Telefónica en Alcalá de Henares [30], Madrid, funciona gracias al 100% de energía renovable. El CPD ha sido certificado como LEED Gold[38] debido a la eficiencia energética lograda gracias al uso de fuentes renovables cuya huella de carbono se ha

[38] La obtención de la certificación Oro denota que un edificio ha sobresalido en su diseño y funcionamiento sostenibles, obteniendo más del 60% de los puntos LEED. Este prestigioso nivel es indicativo de la adopción integral de las mejores prácticas en materia de sostenibilidad por parte de un proyecto.

https://www.telefonicaempresas.es/grandes-empresas/blog/nace-en-alcala-el-data-center-mas-fiable-del-mundo/

disminuido. De hecho, el Greenpeace afirmó con la referencia a Estudio 2020 que los CPD que se alimentan de energía renovable pueden disminuir sus emisiones de carbono hasta en un 50% en comparación con los CPD que funcionan con energías fósiles.



Figura 3-4 CPD de Telefónica en Alcalá de Henares (Fuente: Telefónica empresas 2024) [30]

3.2.2.3 Acceso a infraestructuras críticas

La sostenibilidad de un CPD también puede depender de su *acceso a infraestructuras críticas*, incluidas las redes de transporte y telecomunicaciones y el abastecimiento de agua. La proximidad a las fuentes de agua natural también puede ser relevante para los sistemas de refrigeración accionados por agua, como la refrigeración por evaporación. Sin embargo, dichos sistemas deben diseñarse de acuerdo con los principios subyacentes para minimizar los requerimientos de agua y evitar la sobreexplotación de los recursos locales en áreas con escasez de agua.

La ubicación de los CPD en áreas donde las infraestructuras de transporte existentes son eficientes también puede reducir el impacto ambiental asociado, ya que facilitaría el acceso del personal y reduciría la huella en CO_2 debido a viajes de persona a persona. La cercanía al tendido de redes de telecomunicaciones robustas también es crucial para el CPD operativo eficiencia y la reducción del costo asociado con la conectividad.

3.2.2.4 Protección contra desastres naturales y resiliencia climática

Para garantizar la sostenibilidad a largo plazo, un CPD debe estar ubicado en una zona que ofrezca protección contra desastres naturales y sea resistente al cambio climático. Las zonas con bajo riesgo de inundaciones, terremotos y tormentas son las preferidas, ya que reduce la probabilidad de interrupción de la operación y la necesidad de costosos sistemas de protección. Además, el aumento del nivel del mar en áreas costeras también es preocupante, siendo esta una posible amenaza futura para la infraestructura crítica del CPD.



Figura 3-5 Índice de riesgos de catástrofes por fenómenos naturales (Fuente: Statista 2024) [31]

3.2.2.5 Consideraciones ambientales del entorno

El *entorno natural* y su conservación como parte de él, también deben mencionarse al hablar de la sostenibilidad de la instalación de un CPD. Los proyectos deben evitarse situarse en áreas naturalmente sensibles, como áreas protegidas o reservas naturales, para que el impacto en la biodiversidad y los ecosistemas locales sea mínimo,

La creación de medidas de conservación como corredores ecológicos o la plantación de vegetación autóctona alrededor del CPD puede compensar el impacto de la construcción.

3.3 Gestión del ciclo de vida de un CPD

3.3.1 Diseño para la sostenibilidad desde el inicio hasta el desmantelamiento

El enfoque sostenible de un CPD debería comenzar desde la fase de diseño, permitiendo la arquitectura de soluciones amigables con el medio ambiente que se extienden a lo largo del ciclo de vida del CPD. El ciclo de vida de un CPD se refiere desde cuando se diseña por primera vez hasta su demolición. El diseño sostenible [29] debería centrarse en:

- **Selección de materiales:** esto implica el uso de materiales reciclables y amigables desde la etapa de construcción, tal como se ilustra en el apartado 4.1. Usar materiales sostenibles permite que sean reciclados durante la demolición.
- **Diseño modular:** un CPD modular garantiza que sus partes pueden ser ensambladas y desmontadas fácilmente, para posibles expansiones o modificaciones sin generar sustento. Esto permite a un CPD ser demolido sin afectar todo el sistema.
- **Reducción de la huella de carbono:** el uso de energía renovable a través de todas las fases operativas, junto con un mecanismo que minimice la liberación de CO_2 para la construcción u operación.
- **Desmantelamiento y reciclaje:** las políticas de demolición deberían ser hechas durante la etapa de diseño para garantizar que el CPD sea demolido al final de su vida útil en un proceso de demolición amigable con el medio ambiente. Esto debería incluir políticas para reutilizar materiales y componentes tecnológicos y librar cualquier material peligroso.

3.3.2 Gestión de residuos y reciclaje de componentes electrónicos

El desecho de residuos electrónicos (*e-waste*) [32], es un desafío crítico en la sostenibilidad de los CPD. La AIE señala que, a nivel mundial, los centros de datos generan una cantidad significativa de residuos electrónicos, incluidos los componentes de servidores, sistemas de enfriamiento y redes que han llegado al final de su ciclo de vida.

Algunas de las estrategias de desecho y reciclaje incluyen:

- **Reciclaje de equipos electrónicos:** existen empresas especializadas en reciclaje de equipos de TI que pueden recuperar materiales valiosos como el cobre, aluminio y metales preciosos de componentes electrónicos desechados. En España, hay una normativa que regula la gestión de este tipo de residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), basada en la Directiva Europea 2012/19/UE.
- **Desmantelamiento seguro:** es importante que se sigan prácticas de desmantelamiento seguro de los componentes electrónicos, eliminando de manera responsable aquellos que contienen materiales peligrosos, como el plomo, mercurio o cadmio, que pueden estar presentes en baterías y otros dispositivos.
- **Recuperación de piezas reutilizables:** algunos componentes electrónicos pueden reutilizarse en otros dispositivos o tener una segunda vida en otros sectores industriales.

3.3.3 Estrategias de prolongación de la vida útil de los equipos

Una estrategia muy efectiva para reducir la huella ambiental de un CPD es la prolongación de la vida útil de los equipos tecnológicos utilizados. Esto disminuye la generación de residuos, pero también disminuye la necesidad de nuevos materiales y degradación del medio ambiente en la producción de componentes.

Hay varias medidas que contribuyen a la prolongación de la vida útil:

- **Mantenimiento preventivo y correctivo:** con un mantenimiento adecuado de los equipos, se ayuda a prevenir fallos prematuros y maximiza su eficiencia a lo largo del tiempo.
- **Actualización de *hardware*:** actualizando solo componentes específicos (memoria, almacenamiento o tarjetas de red), en lugar de reemplazar servidores y dispositivos completos, lo que permite alargar la vida útil de los equipos.
- **Renovación tecnológica:** este enfoque apunta a la renovación de equipos, en lugar de su reemplazo, lo que también contribuye a la disminución del consumo de recursos. Empresas como Dell y HPE ofrecen servicios de modernización que posibilitan la modernización de sistemas sin la adquisición de nuevo hardware.
- **Redistribución de cargas de trabajo:** mediante la redistribución óptima de la carga entre los servidores, se reduce la intensidad de la operación de uno y, en consecuencia, se prolonga su vida útil.

3.3.4 Políticas de economía circular aplicadas a los CPD

La economía circular [33] es un enfoque en el cual, los recursos son usados de una manera eficiente y los desechos son minimizados, disminuyendo la posibilidad de que algo se elimine, realizando reciclaje y recuperación de productos. Los principios de economía circular aplicable a los CPD permiten mejorar el ciclo de vida de cada elemento y reducir el impacto medioambiental.

Principios de la economía circular en CPD:

- **Reutilización de equipos y componentes:** los CPD a través del programa de reutilización, extienden la vida de los servidores y otros equipos, redistribuyéndolos a operaciones de baja demanda antes de reciclarlos.

- **Ciclo cerrado de materiales:** los CPD diseñan sus equipos de manera que se puedan reciclar y reinscribir en la cadena de suministro, volviendo los desechos electrónicos en nuevos productos.
- **Servicios como infraestructura:** en lugar de comprar, los CPD en muchas empresas prefieren los modelos como el *IaaS* o *la* nube, reduciendo la compra de equipos físicos.

Ejemplos en España incluyen la implementación de plataformas *cloud* que acaban con la necesidad de comprar servidores, además de proliferadas instalaciones de CPD de nuevo tipo. Actualmente, muchos CPD utilizan sistemas de leasing de equipos para extender la vida de los dispositivos.

3.3.5 Implementaciones de CPD sostenibles

La implementación de infraestructuras que incluyan CPD sostenibles, basados en eficiencia energética no es una idea abstracta o hipotética, ya que existen iniciativas reales que demuestran su viabilidad. En el Anexo III (Iniciativas recientes en CPD sostenibles), se recogen diferentes ejemplos de centros de datos que han implementado soluciones sostenibles utilizando energías renovables.

Estos ejemplos ilustran cómo las grandes empresas tecnológicas y la investigación académica están avanzando hacia la sostenibilidad en los centros de datos mediante la integración de energías renovables y tecnologías innovadoras. Estas iniciativas demuestran como su implementación reduce los costes operativos, disminuye la huella de carbono y promueve la eficiencia energética a largo plazo.

4 RESULTADOS

4.1 CPD tradicional vs sostenible

La adopción de tecnologías y estrategias sostenibles en los CPD, puede generar múltiples beneficios a largo plazo para el ambiente y la empresa que opera los CPD. Por otro lado, la implementación de estas prácticas también implica elevados costos iniciales.

A continuación, se exponen someramente la relación entre el costo y el beneficio de construir y operar un *CPD tradicional* en comparación con un *CPD sostenible*.

4.1.1 Costos

4.1.1.1 Costos de construcción y diseño

Los costos de construcción del CPD verde son significativamente más elevados en comparación con un CPD convencional. La razón principal detrás de esto es la necesidad de un CPD sostenible de utilizar sistemas de refrigeración eficientes y más costosos, materiales sostenibles y fuente de energía renovable. Según la investigación de Gartner [34], el costo adicional asociado con CPD verde puede oscilar entre el 10 y el 30 por ciento.

Tipo de CPD	Costo de construcción por metro cuadrado ($)
Convencional	7.000 – 10.000
Verde sostenible	8.000 – 13.000

Tabla 4-1. Comparación de costos iniciales entre CPD convencional y CPD verde [34]

Además, la implementación de materiales y prácticas sostenibles especificas eleva los costos requeridos para obtener un CPD verde con certificación LEED o BREEAM etc.

4.1.1.2 Costos operativos y mantenimiento

Aunque los costos de construcción sean más elevados, existen tendencias de que los CPD verdes poseen costos operativos inferiores debido a su eficiencia energética y uso de energía renovable. Por

ejemplo, la Adiabática o *Free cooling* puede reducir significativamente el costo de climatización, dado que reduce la necesidad de Igualmente, sistemas de paneles solares permiten el uso de la energía renovable y reducen los costos de asociados a la climatización.

Un estudio llevado a cabo por *Uptime Institute* en 2020 [35] afirmó que "los centros de datos que operan con energía renovable y equipos de refrigeración eficientes podrían ahorrar entre un 20 y un 30 por ciento de los costos operativos anuales en comparación con un centro de datos promedio".

Tipo de CPD	Costo operativo por rack al año ($)
Convencional	2.500 - 5.000
Verde sostenible	1.800 - 3.500

Tabla 4-2. Comparación de costos operativos anuales [35]

4.1.2 Beneficios

4.1.2.1 Ahorro energético y reducción de costos a largo plazo

Reducir el consumo de energía es un gran atractivo para centrar operaciones empresariales en verde. Los centros de datos sostenibles trabajan para maximizar la eficiencia energética a través de innovaciones como refrigeración, sensores de gestión energética y energía solar integrada. A medida que los costos de energía suben, las empresas con centros de datos verdes registran ahorros continuos a largo plazo.

Un estudio de Greenpeace [36] también afirmó que, dependiendo de los métodos utilizados, los centros de datos han logrado reducir facturas de energía en un 40%.

Año de operación	CPD Convencional (kWh/m²)	CPD Verde (kWh/m²)	Reducción Energética (%)
Año 1	2.500	1.800	28%
Año 5	2.750	1.700	38%
Año 10	3.000	1.650	45%

Tabla 4-3. Reducción de consumo energético en CPD verdes [36]

4.1.2.2 Reducción de la huella de carbono

Cualquier reducción en el consumo de energía también reduce las emisiones de carbón. Integrando fuentes de energía limpia como la solar y el viento y minimizando el uso de fósiles, un centro de datos verde realiza una contribución considerable al sistema ecológico.

4.1.2.3 Cumplimiento regulatorio y mejor imagen corporativa

En muchos países, los centros de datos están sujetos a estrictas regulaciones ambientales. Adoptar un enfoque sostenible garantiza que el centro de datos cumpla con las normativas ambientales actuales, evitando multas y sanciones por incumplimiento. Además, las certificaciones ecológicas implementadas, como ISO 14001 y LEED, pueden proporcionar múltiples ventajas operativas y mejorar la imagen de la empresa con un enfoque ambientalmente responsable y sostenible.

Según una encuesta realizada por *Forrester Research* [37], más del 65% de los consumidores prefieren trabajar con empresas que demuestren principios sostenibles, lo que significa que los centros de datos ecológicos no solo mejoran el rendimiento operativo, sino que también hacen la experiencia del usuario final más atractiva para las marcas que implementan estas soluciones.

4.1.2.4 Retorno de la inversión en un CPD verde sostenible

Aunque los costos iniciales de construir un centro de datos verde son más altos, los ahorros operativos y la reducción de la huella de carbono generan un retorno favorable de la inversión a largo plazo. Del estudio realizado por *Uptime Institute* [35], mostró que los centros de datos verdes pueden recuperar las inversiones realizadas en un período de 5 a 7 años, dependiendo del tamaño de la instalación y de la proporción de energía renovable consumida.

Año	**Ahorro acumulado** ($)	**Costo inicial** ($)	**ROI acumulado (%)**
Año 1	50.000	300.000	17%
Año 5	250.000	300.000	83%
Año 7	400.000	300.000	133%

Tabla 4-4. Estimación del Retorno de la Inversión en CPD Verde [35]

4.2 Análisis DAFO

En un mundo cada vez más enfocado en la sostenibilidad y la eficiencia energética, la transición hacia CPD sostenibles basados en energías renovables se presenta como una estrategia fundamental. Este cambio responde a la creciente necesidad de reducir la huella de carbono asociada a las infraestructuras digitales, las cuales constituyen un componente clave en la economía global.

La implementación de un CPD sostenible implica desafíos técnicos, económicos y estratégicos, que deben ser evaluados de manera integral para garantizar el éxito del proyecto. En este contexto, el análisis DAFO (Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades) se configura como una herramienta esencial para examinar la viabilidad de dicha transición. Este enfoque permite identificar las ventajas competitivas, mitigar los riesgos asociados y aprovechar las oportunidades que ofrecen las energías renovables en términos de sostenibilidad, ahorro de costos y cumplimiento normativo.

Con objeto de conseguir una visión integrada y coherente de la organización, que permita desarrollar estrategias efectivas para la implementación de un CPD sostenible basado en energías renovables en sustitución de un CPD tradicional, es conveniente identificar las áreas en las que se pueden aprovechar sus fortalezas y oportunidades, y al mismo tiempo, abordar sus debilidades y amenazas para minimizar los riesgos, con objeto de estructurar una estrategia efectiva y alineada con los objetivos de desarrollo sostenible.

Para ello como herramienta de gestión para analizar la situación actual y la repercusión que podría tener su implementación en una organización, se ha realizado un análisis que se recoge en el Anexo IV (Análisis DAFO).

Como conclusión de este análisis DAFO realizado, se evidencia que la implementación de un CPD sostenible basado en energías renovables representa una oportunidad estratégica significativa para la organización, tanto desde el punto de vista ambiental como económico. Las fortalezas y oportunidades identificadas destacan el potencial de reducir la huella de carbono, mejorar la eficiencia operativa y aprovechar incentivos gubernamentales y normativas que favorecen el uso de energías renovables. Además, este cambio responde a la creciente demanda social y empresarial de adoptar prácticas

sostenibles, lo que puede traducirse en una mejora de la reputación corporativa y una ventaja competitiva en el mercado.

Sin embargo, el éxito de esta transición dependerá de la capacidad de la organización para afrontar las debilidades y amenazas asociadas, como los altos costos iniciales, la necesidad de formación técnica especializada y los posibles riesgos de obsolescencia tecnológica. Será fundamental desarrollar un plan de acción integral que contemple estas variables, asegurando una adecuada gestión de riesgos y la maximización de los beneficios a largo plazo.

En este sentido, la realización de un análisis DAFO no solo permite identificar los factores críticos de éxito, sino también priorizar acciones estratégicas que garanticen una transición eficiente y sostenible. Con un enfoque bien estructurado, el nuevo modelo de procesamiento de datos basado en energías renovables puede convertirse en un pilar fundamental para alcanzar los objetivos de sostenibilidad de la organización, contribuyendo al cumplimiento de los compromisos globales frente al cambio climático y posicionándola como líder en innovación sostenible dentro de su sector.

5 ANÁLISIS DE VIABILIDAD DEL CPD SOSTENIBLE

5.1 Contexto y justificación del CPD sostenible

El análisis de viabilidad de implica evaluar los costos de instalación, los ahorros operativos, la sostenibilidad a largo plazo, los beneficios medioambientales, las regulaciones gubernamentales y las posibles barreras tecnológicas. A continuación, presento un análisis detallado que abarca estos aspectos, haciendo referencia a fuentes de estudios de caso y literatura académica.

Un CPD sostenible es aquel que busca minimizar su impacto ambiental, reducir los costos operativos relacionados con la energía y promover el uso de tecnologías limpias. Para una institución pública o empresa, la viabilidad de un CPD sostenible depende de varias dimensiones: la inversión inicial, la eficiencia energética, el retorno de la inversión (ROI) y el cumplimiento con normativas medioambientales.

En este análisis se ha tomado como referencia un estudio realizado sobre el CPD sostenible implementado por el gobierno de Noruega para sus instituciones públicas [38]. Este proyecto involucró la transición hacia un modelo de CPD alimentado por energías renovables, con un enfoque en la eficiencia operativa y la reducción de emisiones de carbono.

5.2 Costos iniciales y de infraestructura

La construcción de un CPD sostenible implica una serie de inversiones iniciales, que incluyen la infraestructura energética (energía renovable), la implementación de servidores eficientes y la instalación de sistemas de refrigeración avanzados.

Según un informe de la Agencia Noruega de Energía (2023) [39], la inversión inicial en un CPD sostenible para una institución pública en Noruega alcanzó los 25 millones de euros. Esta cifra incluye los costos de la infraestructura energética (paneles solares, turbinas eólicas), los sistemas de enfriamiento basados en agua y las tecnologías de almacenamiento de energía.

5.3 Costos operativos y ahorros en energía

Los CPD sostenibles utilizan energías renovables, lo que permite una reducción significativa de los costos operativos a largo plazo. La energía renovable, especialmente la solar y la eólica, representa una forma eficiente de abastecer la energía de estos centros.

Según el estudio de *The Green Grid* (2021) [40], los ahorros anuales de energía en un CPD sostenible pueden llegar hasta un 40% en comparación con un CPD tradicional.

El informe del gobierno noruego menciona que, después de 5 años de operación, los ahorros anuales en costos energéticos alcanzaron los 2 millones de euros, debido a la adopción de energía renovable. Lo que implica que en dos años y medio se han amortizado los costes iniciales de inversión en infraestructura.

Aspecto	CPD Tradicional	CPD Sostenible
Inversión inicial (€)	15 millones	25 millones
Infraestructura energética	No renovable	Energía solar/eólica
Tecnología de enfriamiento	Refrigeración convencional	Enfriamiento por agua

Tabla 5-1: Comparativa de Costos Iniciales y de Infraestructura [38] [39] [40]

5.4 Impacto ambiental

El impacto ambiental de un CPD sostenible se mide principalmente en la reducción de las emisiones de CO_2. Los CPD sostenibles utilizan tecnologías avanzadas que permiten reducir el consumo de energía y las emisiones de carbono, cumpliendo con las regulaciones medioambientales.

Según Greenpeace (2020) [41], los CPD sostenibles pueden reducir sus emisiones de CO_2 en un 60% en comparación con los centros de datos tradicionales. El CPD de la administración pública en Noruega redujo sus emisiones de CO_2 en 50%, lo que representa un ahorro importante en términos de huella de carbono.

Aspecto	CPD Tradicional	CPD Sostenible
Consumo energético anual (kWh)	15.000.000	8.000.000
Costos operativos anuales (€)	3 millones	1.5 millones
Emisiones de CO_2 (toneladas/año)	15.000	7.500

Tabla 5-2: Comparativa de Ahorros Operativos y Emisiones de CO_2 [41]

5.5 Retorno de inversión (ROI)

El retorno de inversión (ROI) es crucial para evaluar la viabilidad financiera de un CPD sostenible. Aunque la inversión inicial es elevada, los ahorros operativos y la reducción de costos energéticos proporcionan un retorno positivo dentro de un plazo razonable.

Según el análisis realizado por *Accenture* (2021) [42], el ROI de un CPD sostenible se puede obtener en un plazo de 6 a 8 años, debido a los ahorros en costos operativos. En el caso del CPD noruego, el ROI estimado fue del 20% al final del quinto año, impulsado principalmente por la reducción de costos energéticos y la eficiencia operativa.

5.6 Análisis de viabilidad

El análisis de viabilidad demuestra que, aunque la inversión inicial es alta, los beneficios a largo plazo, tales como ahorros en energía, reducción de costos operativos y beneficios medioambientales, justifican la transición hacia este modelo. El ROI estimado, además, proporciona una base sólida para

la viabilidad financiera del proyecto. Las políticas gubernamentales y las normativas de sostenibilidad en Europa también facilitan la implementación de estas infraestructuras.

Este estudio muestra que un CPD sostenible es una opción viable para instituciones públicas y empresas, tanto desde el punto de vista económico como ambiental, siempre que se cumplan las regulaciones y se gestionen adecuadamente los costos iniciales y operativos.

También hay que tener en cuenta las ayudas y subvenciones recibidas por los gobiernos para motivar el ahorro energético y fomentar las medidas en defensa del medio ambiente (ver Anexo IV: Análisis DAFO).

6 LÍNEAS FUTURAS

6.1 Innovaciones tecnológicas

6.1.1 Energías renovables y almacenamiento de energía

6.1.1.1 Innovación en el almacenamiento de energía

La cuestión de la intermitencia es uno de los mayores desafíos para el almacenamiento de energía previsto, por lo tanto, se han desarrollado sistemas de almacenamiento. Las baterías de ion de litio y los sistemas de almacenamiento de hidrógeno permiten a los CPD almacenar energía en períodos con una demanda baja o altos niveles de generación de energías renovables y usarla en períodos de bajo suministro.

Tecnología	Capacidad de Almacenamiento (kWh)	Eficiencia (%)	Vida útil (ciclos)
Baterías de iones de litio	50-500	85-95	5.000
Almacenamiento en hidrógeno	100-1.000	50-60	10.000

Tabla 6-1. Comparativa tipos de baterías (Fuente: elaboración propia)

6.1.1.2 Sistemas de energía distribuida

Otro sistema es el de energía distribuida, donde el centro de datos produce su electricidad a través de paneles solares en su techo o, en su defecto, turbinas eólicas. Al estar conectados a la red, estos sistemas pueden devolver la energía que no consumen en temporadas bajadas de demanda. Los estudios de *Forrester Research* [37] aseguran que estos sistemas de energía distribuida pueden bajar el costo de la energía entre un 15-20% mientras se vuelven menos dependientes en el mismo sector.

6.1.2 Inteligencia artificial para la optimización energética

La IA está creciendo como una herramienta poderosa para la gestión inteligente de los CPD. La IA permite optimizar los sistemas de climatización, la distribución de la carga de trabajo y la gestión de la energía en tiempo real. Empresas como Google utiliza IA en este sentido, bajado un 40% en aire

acondicionado, mientras que también puedes prever cambios de acuerdo a la data y mandar órdenes para bajar la cantidad de electricidad utilizada [43].

6.1.2.1 Predicción de demanda energética

Los algoritmos de aprendizaje automático (*machine learning*) procesan datos históricos, patrones de consumo y variables externas (como condiciones climáticas y eventos sociales) para prever la demanda energética con alta precisión. Esta predicción ofrece las siguientes ventajas:

- Mejora la planificación de la generación y distribución de energía.
- Reduce la necesidad de mantener reservas energéticas excesivas.
- Disminuye la probabilidad de apagones o sobrecargas.

Como ejemplo empresas como Siemens utilizan modelos de IA para anticipar picos de demanda en ciudades, permitiendo a los operadores ajustar sus sistemas en tiempo real.

6.1.2.2 Gestión de redes inteligentes (*Smart Grids*)

Las redes inteligentes son infraestructuras eléctricas que integran IA para monitorear, analizar y gestionar la generación, distribución y consumo de energía de manera eficiente. Entre las características principales destacan:

- Balance de carga: distribución de la electricidad según la demanda en tiempo real.
- Detección y prevención de fallos: uso de algoritmos de IA para identificar problemas antes de que ocurran, como líneas sobrecargadas o equipos defectuosos.
- Optimización de costos: minimización de pérdidas en la transmisión de energía.

Como ejemplo en los Países Bajos, *TenneT*[39] utiliza IA para gestionar una red eléctrica que combina energías renovables y fuentes tradicionales, optimizando el suministro energético a más de 41 millones de hogares.

6.1.2.3 Optimización de procesos industriales

La IA permite analizar procesos industriales complejos para reducir el consumo energético sin comprometer la productividad.

Aplicaciones destacadas:

- Gemelos digitales: réplicas virtuales de equipos y procesos que permiten simular diferentes escenarios para encontrar el punto óptimo de consumo energético.
- Control predictivo: sistemas que ajustan en tiempo real los parámetros de operación para maximizar la eficiencia energética.

Como ejemplo General Electric implementa soluciones basadas en IA para optimizar turbinas y plantas industriales, logrando hasta un 15% de ahorro en el consumo energético.

6.1.2.4 IA en centros de datos

Utilizan estrategias basadas en IA como:

Optimización de la climatización. La IA ajusta la temperatura y la ventilación para mantener las condiciones ideales con el mínimo consumo energético.

Gestión del *hardware*: Ajuste dinámico del uso de servidores según la carga de trabajo.

Como ejemplo Google redujo un 40% el consumo energético en sus centros de datos utilizando IA para optimizar el sistema de enfriamiento.

[39] Operadora del sistema de transmisión (TSO) de los Países Bajos y una parte importante de Alemania, TenneT. Posee y opera más de 25.000 kilómetros de líneas y cables de alto voltaje, y suministra electricidad a 43 millones de usuarios domésticos y comerciales, de forma segura y confiable, las 24 horas del día y los 365 días del año.

Parámetro	Antes de IA	Después de IA	Reducción (%)
Consumo energético HVAC	2.500 kWh/m²/año	1.500 kWh/m²/año	40%
Costos operativos	500.000 $/año	350.000 $/año	30%

Tabla 6-2. Impacto de la IA en consumo energético de los CPD [43]

6.1.3 Plan Nacional de algoritmos verdes

El Plan Nacional de Algoritmos Verdes (PNAV) [44] es una iniciativa del Gobierno de España destinada a promover el desarrollo y la aplicación de tecnologías digitales, especialmente la IA, de manera sostenible y respetuosa con el medio ambiente. Este plan se enmarca en el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, la Agenda España Digital 2026 y la Estrategia Nacional de Inteligencia Artificial.

6.1.3.1 Objetivos principales del PNAV:

6.1.3.1.1 Fomentar la investigación en IA sostenible y tecnologías verdes

Se busca financiar proyectos de investigación interdisciplinarios que sienten las bases para el desarrollo de productos innovadores basados en tecnologías verdes. Esto incluye la creación de cátedras universitarias y áreas temáticas específicas sobre IA e impacto ambiental.

6.1.3.1.2 Impulsar infraestructuras y servicios eficientes

El plan promueve el uso de infraestructuras que permitan la ejecución sostenible de modelos de IA, incentivando el consumo de energía proveniente de fuentes renovables. Se desarrollarán estándares y herramientas para medir el consumo energético de los algoritmos y se implementarán certificaciones para empresas que ofrezcan servicios de hardware y software sostenibles.

6.1.3.1.3 Integrar la IA verde y el blockchain en el tejido productivo.

Se pretende favorecer la creación de nuevos mercados económicos basados en soluciones de IA sostenibles, apoyando la digitalización verde del sector productivo español y promoviendo inversiones en tecnologías sostenibles.

6.1.3.1.4 Dinamizar el mercado español a través de la IA verde y el blockchain verde

El plan busca promover la adopción de modelos de IA en sectores orientados a reducir los efectos del cambio climático, organizando competiciones tecnológicas que ofrezcan soluciones a retos medioambientales.

El PNAV cuenta con una inversión de 257,7 millones de euros provenientes de los fondos europeos *Next Generation EU* y se desarrollará entre 2023 y 2025. Con esta iniciativa, España aspira a posicionarse a la vanguardia en el desarrollo de una IA más responsable con el medio ambiente, apoyando tanto a centros de investigación punteros como al tejido económico del país.

6.1.3.2 Resultados de la implementación de este plan

6.1.3.2.1 Iniciativas y resultados implementados

Fomento de la Investigación en IA Sostenible y Tecnologías Verdes

- **Creación de cátedras universitarias:** se han establecido hasta dos cátedras universitarias centradas en algoritmos verdes, con una inversión estimada de hasta 2,4 millones de euros (Ministerio de Industria).
- **Red Española de excelencia en IA:** se ha desarrollado un área temática específica sobre "IA e Impacto Ambiental" dentro de esta red, promoviendo la investigación interdisciplinar en IA sostenible (Ministerio de Industria).
- ***Spain Talent Hub*:** se ha financiado la atracción de talento investigador en IA verde, apoyando a grupos de expertos con una inversión de un millón de euros (Ministerio de Industria).

Impulso de infraestructuras y servicios eficientes:

- **Desarrollo de estándares y herramientas:** se están creando estándares y herramientas para medir el consumo energético de los algoritmos, concienciando a los desarrolladores sobre el impacto ambiental de sus decisiones (Ministerio de Industria).
- **Certificación de servicios sostenibles:** se promueve la certificación para empresas de hardware y software sostenibles, adoptando buenas prácticas voluntarias (Ministerio de Industria).
- **Sello de calidad *Green Tech*:** se ha introducido un sello para reconocer modelos de IA que cumplen con criterios de sostenibilidad (Ministerio de Industria).

Integración de la IA verde y blockchain en el tejido productivo:

- **Digitalización verde del sector productivo:** se está promoviendo la integración de la IA en las cadenas de valor de la economía, favoreciendo la digitalización verde del sector productivo español (Ministerio de Industria).
- **Misiones I+D+I *Green by Design*:** se han invertido en tecnologías sostenibles dentro de la iniciativa RETECH, impulsando proyectos presentados por las Comunidades Autónomas (Ministerio de Industria).
- **Fondo *Next Tech*:** se está fomentando el desarrollo de proyectos digitales innovadores de alto impacto, también en el ámbito de la IA, con el objetivo de movilizar hasta 8.000 millones de euros en colaboración público-privada (Administración Electrónica).

Dinamización del mercado español a través de la IA verde y blockchain verde:

- **Desafíos green AI:** se han organizado competiciones de desarrollo tecnológico que ofrecen soluciones a retos medioambientales, promoviendo la adopción de modelos de IA en sectores orientados a reducir los efectos del cambio climático (Ministerio de Industria).

Estas iniciativas buscan posicionar a España a la vanguardia en el desarrollo de una IA más responsable con el medio ambiente, apoyando tanto a centros de investigación punteros como al tejido económico del país.

6.2 Tendencias Futuras: Computación cuántica y Edge Computing

6.2.1 Computación cuántica

La computación cuántica es una tendencia emergente que promete dar forma al futuro de los centros de datos. Aunque aún está en sus primeras etapas, tiene el potencial de resolver problemas que las computadoras tradicionales no pueden, y hacerlo mucho más rápido. Los sistemas cuánticos pueden procesar grandes cantidades de datos utilizando una fracción de la energía que consumen los sistemas clásicos.

Al aprovechar principios de la mecánica cuántica como la superposición y el entrelazamiento, ofrece soluciones innovadoras para mejorar la sostenibilidad de los CPD. A continuación, se detallan sus aplicaciones más relevantes [45] [46] [47].

6.2.1.1 Optimización de la distribución de cargas y recursos

Los CPD enfrentan desafíos complejos en la asignación eficiente de recursos y la gestión de cargas de trabajo. La computación cuántica permite resolver problemas de optimización combinatoria con mayor rapidez y precisión que los métodos clásicos. Por ejemplo, algoritmos cuánticos pueden determinar la distribución óptima de tareas entre servidores, minimizando el consumo energético y mejorando la eficiencia operativa.

6.2.1.2 Simulación de materiales para infraestructuras eficientes

La capacidad de las computadoras cuánticas para simular sistemas moleculares complejos facilita el desarrollo de nuevos materiales con propiedades avanzadas. Estos materiales pueden emplearse en la construcción de infraestructuras más eficientes y sostenibles para los CPD, como sistemas de refrigeración innovadores que reduzcan la dependencia de métodos tradicionales de alto consumo energético.

6.2.1.3 Mejora de la seguridad de los datos

La computación cuántica también impacta en la ciberseguridad de los CPD. El desarrollo de algoritmos de cifrado cuántico ofrece niveles de seguridad superiores, protegiendo la información sensible y garantizando la integridad de los datos almacenados y procesados.

6.2.1.4 Integración de servicios de computación cuántica en la nube

La implementación de la computación cuántica como servicio (QCaaS) a través de centros de datos de colocación permite a las organizaciones acceder a capacidades cuánticas sin necesidad de invertir en hardware especializado. Este enfoque facilita la integración de soluciones cuánticas en las infraestructuras existentes, optimizando procesos y mejorando la eficiencia energética de manera sostenible.

6.2.1.5 Planificación y diseño de redes de comunicación

La computación cuántica puede optimizar el enrutamiento y la programación de redes complejas, reduciendo la latencia y mejorando el rendimiento general de las comunicaciones en los CPD. Además, permite una planificación más eficiente de la red, analizando grandes conjuntos de datos para identificar las ubicaciones óptimas de estaciones base y otros componentes, lo que contribuye a una infraestructura más sostenible y eficiente.

6.2.1.6 Reducción del consumo energético en procesos de cálculo

Las computadoras cuánticas tienen el potencial de realizar ciertos cálculos de manera más eficiente que las clásicas, lo que puede traducirse en una disminución del consumo energético asociado a procesos de computación intensivos. Este ahorro energético es doble: por un lado, se reduce la energía necesaria para realizar los cálculos, y por otro, se disminuye la carga térmica generada, lo que a su vez reduce la necesidad de sistemas de refrigeración.

6.2.1.7 Desarrollo de algoritmos de inteligencia artificial más eficientes

La integración de la computación cuántica con la inteligencia artificial permite crear algoritmos que optimizan el uso de recursos en los CPD, mejorando la eficiencia energética y reduciendo el desperdicio. Esto es especialmente relevante en la era digital, donde la innovación empresarial se centra en soluciones tecnológicas avanzadas y sostenibles.

Aspecto	Ventajas	Desventajas
Eficiencia Energética	Reducción significativa del consumo energético en procesos de cálculo intensivos. Menor necesidad de sistemas de refrigeración debido a la disminución de la carga térmica generada.	Requerimientos de energía para mantener las condiciones operativas de los sistemas cuánticos, como temperaturas extremadamente bajas.
Optimización de Recursos	Distribución más eficiente de cargas de trabajo y recursos, mejorando la utilización de la infraestructura existente.	Complejidad en la integración con sistemas clásicos y en la adaptación de las aplicaciones actuales para aprovechar las capacidades cuánticas.
Seguridad de la Información	Implementación de algoritmos de cifrado cuántico que ofrecen niveles de seguridad superiores, protegiendo la información sensible.	Posible obsolescencia de los sistemas de cifrado actuales, requiriendo actualizaciones y migraciones a nuevas tecnologías de seguridad.
Accesibilidad y Costos	Acceso a capacidades cuánticas a través de servicios en la nube, evitando la necesidad de inversiones en hardware especializado.	Altos costos iniciales asociados al desarrollo y mantenimiento de la infraestructura cuántica, así como la escasez de personal especializado.
Desarrollo de Nuevos Materiales	Simulación y diseño de materiales avanzados que pueden mejorar la eficiencia y sostenibilidad de las infraestructuras de los CPD.	Complejidad en la transición y adaptación de los nuevos materiales en las infraestructuras existentes, además de los costos asociados.

Tabla 6-3: Aplicación computación cuántica. Ventajas y desventajas [45] [46] [47]

6.2.2 Edge Computing

Otra tendencia clave es el *Edge Computing* que está transformando los CPD tradicionales al mover el procesamiento de datos más cerca de su fuente. Esto reduce la latencia y el consumo de energía asociados con la transmisión de datos a largas distancias. Según estimaciones de Cisco [48], el uso de tecnología de computación en el borde reducirá el consumo de ancho de banda en un 30% para 2025 y disminuirá la carga sobre los centros de datos centrales.

A continuación, se detallan sus aplicaciones más relevantes [48] [49] [50].

6.2.2.1 Reducción de la latencia y mejora en la eficiencia energética

Al procesar los datos en el borde de la red, el *Edge Computing* disminuye la latencia, permitiendo respuestas más rápidas y eficientes. Esto reduce la carga en los CPD centrales, disminuyendo su consumo energético y contribuyendo a la sostenibilidad.

6.2.2.2 Optimización del ancho de banda

Procesar datos localmente reduce la cantidad de información que debe transmitirse a los CPD centrales, optimizando el uso del ancho de banda y disminuyendo la necesidad de ampliar infraestructuras de red, lo que conlleva un menor impacto ambiental.

6.2.2.3 Mejora en la seguridad y privacidad de los datos

El *Edge Computing* permite que los datos sensibles se procesen localmente, reduciendo los riesgos asociados a su transmisión y almacenamiento en CPD centralizados. Esto mejora la privacidad y seguridad de la información, aspectos cruciales en entornos sostenibles.

6.2.2.4 Escalabilidad y flexibilidad

La implementación de *Edge Computing* facilita la escalabilidad de los servicios, permitiendo a los CPD adaptarse a las demandas cambiantes sin necesidad de grandes inversiones en infraestructura, lo que favorece la sostenibilidad económica y ambiental.

6.2.2.5 Resiliencia y continuidad del servicio

Al distribuir el procesamiento de datos, el *Edge Computing* aumenta la resiliencia de los sistemas, permitiendo que los CPD mantengan la continuidad del servicio incluso ante fallos en la red o en los servidores centrales.

Aspecto	Ventajas	Desventajas
Eficiencia Energética	Reducción del consumo energético en CPD centrales al disminuir la carga de procesamiento. Menor necesidad de enfriamiento en los CPD debido a la distribución de la carga.	Incremento del consumo energético en dispositivos periféricos, lo que puede aumentar la complejidad en la gestión energética global.
Latencia	Disminución significativa de la latencia al procesar datos cerca de su origen.	Complejidad en la sincronización de datos entre múltiples nodos de borde y los CPD centrales.
Seguridad y Privacidad	Mejora en la protección de datos sensibles al evitar su transmisión a través de redes públicas.	Aumento de los puntos potenciales de ataque debido a la mayor cantidad de dispositivos conectados.
Costos	Reducción de costos operativos al disminuir la necesidad de ancho de banda y procesamiento centralizado.	Inversión inicial significativa para la implementación de infraestructura de Edge Computing.
Escalabilidad y Flexibilidad	Mayor capacidad para adaptarse a incrementos en la demanda sin necesidad de ampliar significativamente los CPD centrales.	Complejidad en la gestión y mantenimiento de una infraestructura distribuida.

Tabla 6-4: Aplicación Edge Computing. Ventajas y desventajas [48] [49] [50]

La implementación del *Edge Computing* en los CPD ofrece múltiples beneficios para la sostenibilidad, incluyendo la reducción del consumo energético, mejora en la latencia y optimización de recursos. Sin embargo, también presenta desafíos como la complejidad en la gestión de infraestructuras distribuidas y consideraciones de seguridad que deben ser abordados para maximizar sus ventajas.

7 CONCLUSIONES

7.1 Conclusiones

El TFM aborda de manera integral los desafíos y oportunidades asociados al diseño y gestión de CPD sostenibles, subrayando la importancia de adoptar enfoques ecológicos y eficientes para garantizar la sostenibilidad en la era digital.

A continuación, se destacan las principales conclusiones derivadas de este trabajo:

- *Importancia de la sostenibilidad en los CPD*
  - Los CPD representan una parte creciente del consumo energético global, estimándose que podrían alcanzar hasta el 8% de la electricidad mundial para 2030, según datos de la Agencia Internacional de Energía. Esto subraya la necesidad urgente de reducir su huella de carbono.
  - La implementación de energías renovables y tecnologías eficientes en los CPD no solo mitiga los efectos ambientales, sino que también contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente en las áreas de acción climática y energía limpia.
- *Ventajas de los CPD sostenibles*
  - Reducción del impacto ambiental: los CPD verdes pueden disminuir las emisiones de CO2 en hasta un 14% frente a los tradicionales, contribuyendo al combate del cambio climático.
  - Eficiencia operativa y reducción de costos: el uso de tecnologías como el free cooling y fuentes renovables reduce significativamente los costos energéticos, mejorando la competitividad de las empresas.
  - Cumplimiento normativo y mejora reputacional: la alineación con estándares internacionales como ISO 50001 y certificaciones como LEED refuerza el compromiso ambiental de las organizaciones y mejora su imagen frente a clientes y regulaciones institucionales.
- *Desafíos de implementación*
  - Aunque las tecnologías sostenibles ofrecen beneficios a largo plazo, su adopción enfrenta barreras iniciales significativas, como altos costos de inversión y la necesidad de formación especializada para el personal técnico.

  - Es fundamental realizar estudios de viabilidad técnica y económica, como los presentados en el trabajo, para demostrar que la transición hacia CPD sostenibles es rentable y viable.
- *Avances tecnológicos clave*
  - La inclusión de innovaciones como la inteligencia artificial para la optimización energética y la aplicación de tecnologías de refrigeración eficientes (refrigeración adiabática, inmersión líquida) son pasos decisivos para mejorar la sostenibilidad de los CPD.
  - Además, se resalta el potencial del almacenamiento energético de nueva generación y el uso de energía renovable como elementos esenciales para la sostenibilidad a largo plazo.
- *Gestión y normativas como marco estructural*
  - La implementación de un sistema de gestión de la energía, como el establecido por la ISO 50001, permite un ciclo de mejora continua que optimiza el uso de recursos y asegura el cumplimiento con estándares ambientales.
  - Las certificaciones como AENOR EA 004 y metodologías como LEED y BREEAM ofrecen guías claras para evaluar y certificar los esfuerzos de sostenibilidad en los CPD.
- Impacto *estratégico* para las Instituciones
  - En el contexto de las instituciones públicas, la transición hacia CPD sostenibles no solo representa un compromiso ambiental, sino que también refuerza la resiliencia y la seguridad energética, aspectos críticos para su operativa.

7.2 Perspectivas Futuras

Este trabajo destaca la importancia de seguir explorando tecnologías emergentes como la computación cuántica y el *edge computing*, las cuales podrían redefinir las necesidades de diseño y operación de los CPD. Asimismo, se plantea la integración de la inteligencia artificial como una herramienta para maximizar la eficiencia energética y la optimización de recursos.

Este Trabajo Fin de Máster no solo evidencia la necesidad urgente de transformar los CPD hacia modelos sostenibles, sino que también presenta un marco detallado para lograrlo. La combinación de tecnologías avanzadas, normativas claras y una visión estratégica posiciona a los CPD verdes como un pilar clave en la construcción de un futuro más sostenible y eficiente.

8 BIBLIOGRAFÍA

[1] «Web Agencia Internacional de la Energía AIE ». [En línea]. Available: https://iea.blob.core.windows.net/assets/a72d8abf-de08-4385-8711-b8a062d6124a/WEO2020.pdf [Último acceso: 23 noviembre 2024]

[2] Apuntes Máster DIRETIC "Planificación y gestión de infraestructuras TIC" Autor D. Fernando Suárez Lorenzo 2024

[3] «Web Naviax». [En línea]. Available: https://nabiax.com/. [Último acceso: 20 diciembre 2024]

[4] «Web Uptime Institute». [En línea]. Available: https://uptimeinstitute.com/tiers. [Último acceso: 25 noviembre 2024]

[5] «Web SMS». [En línea]. Available: https://www.sme-soluciones.es/. [Último acceso: 25 noviembre 2024]

[6] «Web Digi». [En línea]. Available: https://es.digi.com/blog/post/edge-computing-vs-cloud-computing/. [Último acceso: 25 noviembre 2024]

[7] «Web Data center market». [En línea]. Available: https://www.datacentermarket.es/proyectos/el-cpd-de-aire-networks-valencia-recurre-a-placas-solares-y-renovables/. [Último acceso: 25 noviembre 2024]

[8] «Web Agencia Internacional de Energía». [En línea]. Available: Green Data center: en qué consisten. Ventajas y beneficios | Data Center Market [Último acceso: 25 noviembre 2024]

[9] «Web de sigmaearthe». [En línea]. Available: https://sigmaearth.com/es/ [Último acceso: 14 noviembre 2024]

[10] Informe técnico sobre refrigeración de CPD, Schneider Electric, 2020

[11] «Web de renovables.blog». [En línea]. Available: https://renovables.blog/agua/smart-water-que-es-y-su-papel-en-la-gestion-sostenible-del-agua/ / [Último acceso: 23 noviembre 2024]

[12] ISO 50001:2018(es). Sistemas de gestión de la energía. Requisitos con orientación para su uso

[13] UNE. EA 0044:2013. Especificación técnica de Sostenibilidad Energética en Centros de Proceso de Datos.

[14] «Web de spaingbc.org». [En línea]. Available: http://www.spaingbc.org/files/LEED%20v4%20BD+C%20ESP.pdf [Último acceso: 14 octubre 2024]

[15] «Web de BREEAM ». [En línea]. Available: https://breeam.es/[Último acceso: 2 noviembre 2024]

[16] «Web deSchneider Electric». [En línea]. Available: https://www.se.com/es/es/download/document/998-22308900_2022-ES/ [Último acceso: 22 octubre 2024]

[17] «Web de spaingbc.org». [En línea]. Available: https://www.datacenterdynamics.com/es/features/usos-del-calor-residual-de-los-centros-de-datos/?utm_source=chatgpt.com [Último acceso: 14 octubre 2024]

[18] «Web Greenpeace International». [En línea]. Available: https://www.greenpeace.de/publikationen/20170110_greenpeace_clicking_clean.pdf. [Último acceso: 30 noviembre 2024]

[19] Informe sobre el Consumo Energético en España. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía 2021.

[20] «Web Green Grid » [En línea]. Available: https://www.thegreengrid.org/en/resources/wue-metric [Último acceso: 30 noviembre 2024]

[21] «Web Uptime Institute». [En línea]. Available: ttps://uptimeinstitute.com [Último acceso: 30 noviembre 24]

[22] «Web sciencedirec» [En línea]. Available: . https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778819316688 [Último acceso: 30 noviembre 2024]

[23] «Web Ashrae». [En línea]. Available: https://spain-ashrae.org/wp-content/uploads/CLIMATIZACI%C3%93N-Y-EFICIENCIA-ENERG%C3%89TICA-EN-LA-INDUSTRIA-CPD.pdf [Último acceso: 15 noviembre 24]

[24] «Web Prointer» [En línea]. Available: https://prointer.es/ [Último acceso: 30 noviembre 2024]

[25] «Web Aermec» [En línea]. Available: https://global.aermec.com/es/focus-datacentre/ [Último acceso: 30 diciembre 2024]

[26] «Web European Energy Efficiency Platforme». [En línea]. Available: ttps://https://e3p.jrc.ec.europa.eu [Último acceso: 30 noviembre 24]

[27] «Web European Energy Efficiency Platforme». [En línea]. Available: ttps://https://e3p.jrc.ec.europa.eu/world-countries/european-union [Último acceso: 30 noviembre 24]

[28] «Web US Green Building Council». [En línea]. Available: https://www.usgbc.org [Último acceso: 15 noviembre 24]

[29] Uptime Institute. (2020). Designing for Sustainability in Data Centers. Uptime Institute Research.

[30] Web European Energy Efficiency Platforme». [En línea]. Available: https://www.telefonicaempresas.es/grandes-empresas/blog/nace-en-alcala-el-data-center-mas-fiable-del-mundo/ [Último acceso: 30 noviembre 24]

[31] «Web Startista». [En línea]. Available: https://es.statista.com/temas/3597/desastres-naturales/ [Último acceso: 20 noviembre 24]

[32] Green Grid. (2021). Sustainable Data Center Practices: Best Practices in E-Waste Management. Green Grid

[33] Circular Economy Institute. (2020). Circular Economy Models for Data Centers in Europe. CEI Publications.

[34] «Web Gartner». [En línea]. Available: https://www.gartner.es/es/articulos/estas-subestimando-el-potencial-de-la-tecnologia-sostenible [Último acceso: 20 noviembre 24]

[35] «Web Data Center Dynamics». [En línea]. Available: https://www.datacenterdynamics.com/es/opinion/c%C3%B3mo-los-operadores-de-centros-de-datos-pueden-hacer-la-transici%C3%B3n-a-la-energ%C3%ADa-renovable/ [Último acceso: 20 noviembre 24]

[36] «Web Greenpeace». [En línea]. Available:https://www.greenpeace.org [Último acceso: 30 noviembre 24]

[37] «Web Forrester». [En línea]. Available:https://www.forrester.com/blogs/heat-reuse-in-data-centers-may-be-required-and-regulated/ [Último acceso: 22 noviembre 24]

[38] «Web Gobierno Noruego ». [En línea]. Available: //www.regjeringen.no [Último acceso: 30 diciembre 24]

[39] «Web Agencia Noruega de Energía ». [En línea]. Available: https://www.nve.no/ [Último acceso: 30 diciembre 24]

[40] «Web The Green Grid». [En línea]. https://www.thegreengrid.org/ [Último acceso: 30 diciembre 24]

[41] «Web Greenpeace». [En línea]. https://www.greenpeace.org [Último acceso: 30 diciembre 24]

[42] «Web Accenture». [En línea]. Available: https://www.accenture.com [Último acceso: 30 diciembre 24]

[43] «Web Google AI». [En línea]. Available: https://ai.google/research [Último acceso: 10 diciembre 24]

[44] «Web Ministerio de Economía, Comercio y Empresa». [En línea]. Available:] https://portal.mineco.gob.es/RecursosNoticia/mineco/prensa/noticias/2022/2.0221213_plan_algoritmos_verdes.pdf [Último acceso: 27 diciembre 24]

[45] «Web CIO». [En línea]. Available: https://www.cio.com/article/3569969/computacion-cuantica-para-optimizar-la-red-de-distribucion-electrica-de-i-de-en-espana.htm [Último acceso: 10 diciembre 24]

[46] «Web Data Center Dynamics». [En línea]. Available: https://www.datacenterdynamics.com/es/opinion/acelerando-la-accesibilidad-de-la-computaci%C3%B3n-cu%C3%A1ntica-a-trav%C3%A9s-de-centros-de-datos-de-colocaci%C3%B3n/ [Último acceso: 26 diciembre 24]

[47] «Web Keyfactor». [En línea]. Available: https://www.keyfactor.com/es/blog/the-potential-of-quantum-computing-broken-down-by-industry/ [Último acceso: 26 diciembre 24]

[48] «Web Cisco». [En línea]. Available: https://www.cisco.com [Último acceso: 10 diciembre 24]

[49] «Web Siemens». [En línea]. Available: https://ciudadesdelfuturo.es/que-es-el-edge-computing.php? [Último acceso: 26 diciembre 24]

[50] «Web Accenture ». [En línea]. Available: //www.accenture.com/es-es/services/industry-x-0/production-operations [Último acceso: 28 diciembre 24]

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ABREVIATURAS

5G	Redes móviles que utilizan tecnología de quinta generación
ACV	Análisis del ciclo de vida
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
AIE	Agencia Internacional de Energía
ARM	Máquina avanzada de conjunto de instrucciones reducido
ASHRAE	Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado
BREEAM	Método de Evaluación Ambiental del Establecimiento de Investigación en Construcción
CDP	Proyecto de Divulgación de Carbono
CO_2	Dióxido de carbono
COV	Compuestos orgánicos volátiles
CPD	Centro de Procesamiento de Datos
CRAC	Acondicionadora de aire en salas de computación
DAFO	Debilidades Amenazas Fortalezas y Oportunidades
DCiE	La tecnología de interconexión de centros de datos
DJSI	Índices de sostenibilidad Dow Jones
ERF	Factor de reutilización de energía
FSC.	Consejo de Administración Forestal
GEI	Gases de efecto invernadero
GRESB	Referencia global de sostenibilidad inmobiliaria
GRI	Iniciativa Global de Informes
GSE	Sistema de Gestión de Energía
HEPA	Colector de partículas de alta eficiencia
HVAC	Calefacción, ventilación y aire acondicionado
IA	Inteligencia Artificial
IaC	Infraestructura como código
IDS	Sistemas de detección de intrusiones
IoT	Internet de las Cosas
IPS	Sistemas de prevención de intrusiones
ISO	Organización internacional de Normalización

IT	Tecnologías de la información
KPIs	Indicadores clave de desempeño
LED	Diodo Emisor de Luz
LEED	Liderazgo en energía y Diseño Ambiental
MSA	Abundancia media de especies
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de Naciones Unidas
PHVA	Planificar-Hacer-Verificar-Actuar
PNAV	Plan Nacional de Algoritmos Verdes
PUE	Eficacia del uso de energía
PYMEs	Pequeñas y medianas empresas
RAEE	Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos
REF	Factor de energía renovable
RISC	Ordenador con conjunto de instrucciones reducido
ROI	Retorno de la Inversión
SASB	Junta de Normas de Contabilidad de Sostenibilidad
SBTi	Iniciativa de Objetivos Basados en la Ciencia
SGE	Sistema de Gestión de la Energía
TCFD	Grupo de Trabajo sobre Divulgaciones Financieras. Relacionadas con el Clima
TFM	Trabajo Fin de Máster
TIC	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
TIER	Jerarquía que categoriza la disponibilidad y redundancia en CPD
UPS	Sistema de Alimentación Ininterrumpida
USGBC	El Consejo de la Construcción Ecológica de Estados Unidos
UTAS	Unidades de tratamiento de aire
WUE	Efectividad del uso del agua

ANEXO I: COMPARATIVA LEED VS BREEAM

En el contexto actual de creciente preocupación por la sostenibilidad y la eficiencia energética, los estándares de certificación ambiental como *LEED* (*Leadership in Energy and Environmental Design*) y *BREEAM* (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*) han adquirido una relevancia clave en el diseño y operación de edificios. Ambos sistemas proporcionan marcos para evaluar y certificar la sostenibilidad de edificaciones, pero presentan diferencias significativas en cuanto a metodología, enfoque y criterios de evaluación.

Los centros de procesamiento de datos (CPD) representan un caso particular de estudio en este ámbito debido a su elevado consumo energético y sus requisitos específicos en cuanto a climatización, infraestructura y seguridad. Por lo tanto, evaluar cómo estos estándares se aplican a los CPD resulta esencial para determinar cuál ofrece mejores herramientas y directrices para promover la sostenibilidad en este tipo de instalaciones.

Categoría	LEED	BREEAM
Eficiencia Energética	Alto enfoque en la optimización de la energía (energías renovables, eficiencia en HVAC).	Evaluación exhaustiva de la eficiencia energética, incluyendo free cooling y energía renovable.
Gestión del Agua	Fomenta tecnologías de ahorro de agua y reciclaje de aguas grises.	Enfocado en gestión sostenible del agua y la eficiencia hídrica.
Uso de Materiales	Promueve materiales sostenibles, reciclados y de bajo impacto.	Similar, con enfoque en materiales de bajo impacto y reducción de residuos.
Refrigeración y Climatización	Fomenta tecnologías de refrigeración eficiente, como free cooling y enfriamiento líquido.	Similar, con énfasis en refrigeración sin agua y enfriadores líquidos.
Innovación Tecnológica	Premia la innovación en eficiencia energética y nuevas tecnologías.	Fomenta tecnologías innovadoras, especialmente en sistemas de refrigeración y eficiencia energética.
Impacto Ambiental	Evaluación y reducción de la huella de carbono. Fomenta el uso de energías renovables.	Similar, con evaluación del impacto ambiental y la reducción de la huella ecológica.
Certificación	Platinum es el nivel más alto, requiere el cumplimiento de criterios exigentes en sostenibilidad.	Outstanding es el nivel más alto, evaluando el rendimiento ambiental integral.
Transporte y Accesibilidad	Fomenta el acceso a transporte público y vehículos eléctricos.	Similar, también promueve la movilidad sostenible y el acceso a vehículos eléctricos.

Tabla A1-1. Cuadro comparativo LEED vs BREEAM (Fuente: elaboración propia)

Tanto *LEED* como *BREEAM* proporcionan directrices claras para hacer de un CPD sostenible un ejemplo de eficiencia energética, uso responsable de recursos y un ambiente saludable. Aunque ambos sistemas se alinean en muchos aspectos, sus principales diferencias son las siguientes:

- *LEED* tiende a centrarse más en la medición de la **eficiencia energética** y el uso de **energías renovables**.
- *BREEAM* tiene un enfoque más **integral** y **holístico**, considerando una gama más amplia de factores ambientales, incluidos los aspectos de salud y bienestar**.**

ANEXO II: MÉTRICAS DE SOSTENIBILIDAD PARA APLICAR EN UN CPD

La sostenibilidad se ha convertido en un eje fundamental para el desarrollo de infraestructuras en el contexto actual de transición hacia economías bajas en carbono. En este escenario, medir y gestionar el desempeño sostenible de estas instalaciones resulta crucial para garantizar su viabilidad a largo plazo y minimizar su huella ambiental.

Este anexo respresenta un cuadro resumen de métricas de sostenibilidad diseñadas para ser aplicadas específicamente en CPD, teniendo en cuenta las particularidades técnicas y operativas de este tipo de instalaciones. Estas métricas permiten evaluar aspectos clave como el consumo energético, la eficiencia en el uso de recursos, la gestión de residuos, las emisiones de carbono y el impacto en el entorno etc. La implementación de estas métricas no solo proporciona una base sólida para la toma de decisiones, sino que también contribuye al cumplimiento de normativas ambientales y estándares internacionales de sostenibilidad.

Se han definido 5 categorías de métricas: energía, emsiones de GEI, agua, residuos y tierra y biodiversidad, contando con cada una de ellas una serie de métricas clave

Categorías métricas	Métricas clave
Energía	• Consumo total de energía • Eficacia del uso de Power(PUE) • Consumo total de energía renovable • Factor de energía renovable (REF) • Factor de reutilización de energía (ERF)
Emisiones de GEI	• Emisiones de GEI: (Directas) • Emisiones de GEI basadas en la ubicación y Mercado (Indirectas) • Adecuación de suministro y consumo hora por hora
Agua	• Uso total de agua del sitio • Consumo total de agua de la fuente de energía • Eficacia del uso del agua (WUE)
Residuos	• Desperdicio total generado • Residuos depositados en vertederos • Residuos desviados • Tasa de desviación de residuos
Tierra y biodiversidad	• Abundancia media de especies (MSA)

Tabla A2-1. Métricas de sostenibilidad a utilizar en un CPD [12]

ANEXO III: INICIATIVAS RECIENTES EN CPD SOSTENBLES

A continuación, se presentan ejemplos reales de centros de datos que han implementado medidas sostenibles para mejorar su eficiencia energética y reducir su impacto ambiental.

Estas iniciativas ilustran cómo diversas organizaciones están adoptando prácticas sostenibles para mejorar la eficiencia energética y reducir su impacto ambiental en el ámbito de los centros de datos y otras infraestructuras críticas.

Google Data Centers

Google ha sido pionero en la implementación de prácticas sostenibles en sus centros de datos. Utiliza un enfoque integral para medir la Eficacia del Uso de Energía (PUE), considerando el rendimiento de toda su flota global de centros de datos y realizando mediciones durante todo el año.

Google se ha comprometido a operar con energía libre de carbono las 24 horas del día, los 7 días de la semana, en todos sus centros de datos. Esto implica utilizar energía limpia para cubrir la cantidad de electricidad necesaria en cada momento y en cada red donde operan. Para lograrlo, ha establecido asociaciones estratégicas para garantizar que sus operaciones sean impulsadas por energía limpia en todo momento[40].

Greenergy Data Centers

Greenergy Centro de datos (GDC) ofrece a las organizaciones una nueva opción de transformación digital sostenible. Centros de datos de Greenergy ha construido el centro de datos más grande y eficiente de energía en la región báltica, PUE destino menor que la meta establecida por el Pacto Verde Europeo.

GDC opera una instalación de 14.500 metros cuadrados con una capacidad de 31,5 megavatios. Han implementado múltiples niveles de seguridad física y soluciones avanzadas para optimizar la eficiencia energética y garantizar operaciones sostenibles.

Las fuentes de energía renovable y el frío clima nórdico reducen el consumo de energía. El calor residual se utiliza para calentar las oficinas de GDC y también tiene la capacidad técnica para compartir el exceso de calor con una planta de calefacción del distrito, de modo que, posteriormente, podría ser utilizado por edificios residenciales y locales[41].

Merlin Properties y Edged Energy en Lisboa

En octubre de 2024, *Merlin Properties* y *Edged Energy* iniciaron la construcción de un centro de datos en Vila Franca de Xira, cerca de Lisboa. La instalación utilizará energía 100% renovable y está diseñada para minimizar el consumo de agua y energía, incluyendo un sistema de refrigeración sin agua que reduce el consumo energético en un 74%[42].

Hospital Universitario Punta de Europa en Algeciras

Aunque no es un centro de datos, este hospital inició en diciembre de 2024 un proyecto de eficiencia energética que incluye la instalación de placas solares para reducir en más del 30% su consumo energético y disminuir las emisiones de CO_2 en aproximadamente 3,299 toneladas anuales.

[40] *https://www.google.com/intl/es-419/about/datacenters/efficiency*

[41] *https://www.juniper.net/mx/es/customers/greenergy-data-centers-case-study.html*

[42] *https://cincodias.elpais.com/companias/2024-10-16/merlin-y-edged-energy-inician-la-construccion-de-un-centro-de-datos-en-lisboa.html*

Fribin en Binéfar

En diciembre de 2024, durante un evento en Binéfar, se destacó a la empresa Fribin como pionera en la implementación de Certificados de Ahorro Energético (CAE), una medida que promueve la eficiencia energética en el sector industrial[43].

Microsoft en Irlanda

Microsoft ha establecido acuerdos de compra de energía (PPA) en Irlanda para más de 900 megavatios de nueva capacidad de electricidad renovable. La empresa prevé que, para 2025, sus centros de datos en Irlanda estarán respaldados al 100% por energía renovable proveniente de estos proyectos[44].

Facebook Sarpy Data Center

El Centro de Datos *Sarpy de Facebook*, ubicado en Nebraska, Estados Unidos, funciona con energía 100% renovable suministrada por el parque eólico Rattlesnake Creek de Enel Green Power. Esta iniciativa forma parte del compromiso de Facebook de alimentar todas sus operaciones globales con energía renovable[45].

Amazon Web Services (AWS)

Amazon ha establecido el objetivo de invertir en sistemas de energía eólica y solar para utilizar un 80% de energías renovables en todas sus operaciones comerciales para 2024, y alcanzar el 100% para 2030[46].

[43] *https://cadenaser.com/andalucia/2024/12/11/el-hospital-punta-europa-arranca-con-su-proyecto-de-eficiencia-energetica-radio-algeciras*

[44] *https://cadenaser.com/aragon/2024/12/13/empresas-energeticas-destacan-en-binefar-nuevas-medidas-en-eficiencia-energetica-ser-aragon-oriental*

[45] *https://news.microsoft.com/source/latam/features/sostenibilidad/a-medida-que-el-mundo-se-vuelve-digital-los-centros-de-datos-que-hacen-que-la-nube-funcione-buscan-fuentes-de-energia-renovable*

[46] *https://www.enelgreenpower.com/es/historias/articles/2019/06/facebook-sarpy-data-center-energia-renovable*

ANEXO IV: ANÁLISIS DAFO

ANÁLISIS INTERNO	
FORTALEZAS	**DEBILIDADES**
Reducción del impacto ambiental mediante el uso de energías renovables - Los CPD verdes utilizan fuentes como energía solar, eólica o hidráulica para reducir las emisiones de carbono. Esto no solo disminuye el impacto ambiental, sino que también puede proporcionar energía más estable a largo plazo. - Implementación de tecnologías como paneles solares o sistemas de generación eólica in situ. **Mejora de la reputación empresarial al alinearse con políticas verdes:** - Las empresas que adoptan prácticas sostenibles son percibidas como innovadoras y responsables. Esta ventaja competitiva puede atraer a socios comerciales, clientes y empleados interesados en sostenibilidad. **Optimización del consumo energético y reducción de costos operativos a largo plazo:** - Tecnologías como la virtualización de servidores, el uso de sistemas de refrigeración eficiente (por ejemplo, enfriamiento adiabático o enfriamiento por aire exterior) y la adopción de tecnologías de almacenamiento flash, permiten reducir significativamente el consumo energético. - Implementación de sistemas de gestión inteligente para monitorizar y optimizar el uso energético en tiempo real.	**Inversión inicial elevada para infraestructura y tecnologías sostenibles** - Implementar tecnologías como sistemas de baterías de almacenamiento energético, paneles solares o sistemas de refrigeración de alta eficiencia tiene un coste elevado. (Por ejemplo: cambiar a sistemas de refrigeración por inmersión líquida implica una inversión significativa tanto en hardware como en infraestructura). **Necesidad de conocimientos técnicos especializados para implementación y gestión:** - La gestión de un CPD sostenible requiere personal capacitado en tecnologías como gestión de energía distribuida, sistemas híbridos de energía renovable y monitorización avanzada de sistemas. - Hay escasez de profesionales formados en áreas específicas como *IT sostenible* o *Green IT*. **Tiempo requerido para el retorno de la inversión (ROI):** - Aunque las tecnologías sostenibles pueden ahorrar costos operativos, el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial puede ser de varios años, dependiendo de factores como el tamaño del CPD y el tipo de tecnologías adoptadas.

Cumplimiento de normativas medioambientales y estándares internacionales:

- Normas como ISO 14001 (gestión ambiental) o certificaciones como LEED y Uptime Institute's Green Data Center reconocen a los CPD sostenibles, ofreciendo una ventaja técnica y legal frente a competidores.

Posibilidad de aprovechar incentivos fiscales o subsidios gubernamentales:

- En muchos países, se ofrecen incentivos económicos, como deducciones fiscales o subvenciones, para proyectos de sostenibilidad energética. Además, el financiamiento "verde" está cada vez más disponible a través de instituciones internacionales.

Posibles interrupciones durante la transición a infraestructuras sostenibles:

- La modernización o migración de un CPD tradicional a uno sostenible puede implicar tiempos de inactividad o pérdida de rendimiento. Esto requiere una planificación detallada para minimizar los riesgos operativos.

Complejidad técnica en la integración con sistemas existentes:

- La compatibilidad de nuevas soluciones sostenibles con infraestructura heredada puede ser problemática, lo que incrementa los costos de migración y la necesidad de soluciones personalizadas.

Tabla A4-1. Análisis interno DAFO (Fuente: elaboración propia)

ANÁLISIS EXTERNO

OPORTUNIDADES

Crecimiento de la demanda de servicios sostenibles por parte de clientes y socios:

- Cada vez más empresas buscan proveedores que compartan sus valores ambientales, lo que abre oportunidades de mercado para los CPD sostenibles.

Innovación tecnológica que permite una mayor eficiencia energética y menor huella de carbono:

- Tecnologías emergentes como refrigeración líquida directa (DLC), uso de AI/ML para gestión predictiva de energía y servidores con hardware más eficiente, están revolucionando el sector.
- Ejemplo: procesadores ARM diseñados para maximizar la eficiencia energética.

Acceso a nuevos mercados enfocados en la sostenibilidad:

- Los mercados europeos y estadounidenses, en particular, están adoptando estrictos estándares ambientales, creando un ecosistema favorable para los CPD sostenibles.

Participación en certificaciones verdes que aumentan la credibilidad:

- Certificaciones como LEED, ISO 50001 (gestión de energía) o el programa Energy Star mejoran la imagen del CPD y facilitan la atracción de clientes conscientes de la sostenibilidad.

AMENAZAS

Aumento de competencia en la implementación de CPD sostenibles:

- Grandes empresas tecnológicas, como Google o Amazon, están invirtiendo agresivamente en CPD verdes, elevando el estándar de sostenibilidad en el sector.

Riesgo de fluctuaciones en los costos de tecnologías verdes o energías renovables:

- La dependencia de tecnologías específicas o recursos renovables puede exponer al CPD a variaciones en los costos o disponibilidad.

Normativas más estrictas que podrían requerir nuevas actualizaciones:

- La regulación ambiental evoluciona rápidamente, lo que puede implicar nuevos requerimientos técnicos, como la adopción de tecnologías aún más eficientes o la reducción adicional de emisiones de carbono.

Impacto de desastres naturales o eventos climáticos extremos en energías renovables:

- Los sistemas basados en energías renovables son vulnerables a factores externos como huracanes, sequías o nevadas extremas, que pueden afectar su rendimiento.

Resistencias internas al cambio por falta de cultura organizacional:

- Cambiar la mentalidad y cultura de las organizaciones tradicionales hacia prácticas sostenibles puede ser un desafío, especialmente cuando los beneficios no son inmediatos.

Estímulos financieros internacionales para proyectos verdes: - Fondos internacionales, como los del Banco Mundial o programas como los Green Bonds, ofrecen financiamiento accesible para proyectos de sostenibilidad.	

Tabla A4-2. Análisis externo DAFO (Fuente: elaboración propia)