INFRAESTRUCTURA ■ ENERGÍA ■ CONECTIVIDAD ■ INVERSIÓN

elecnor

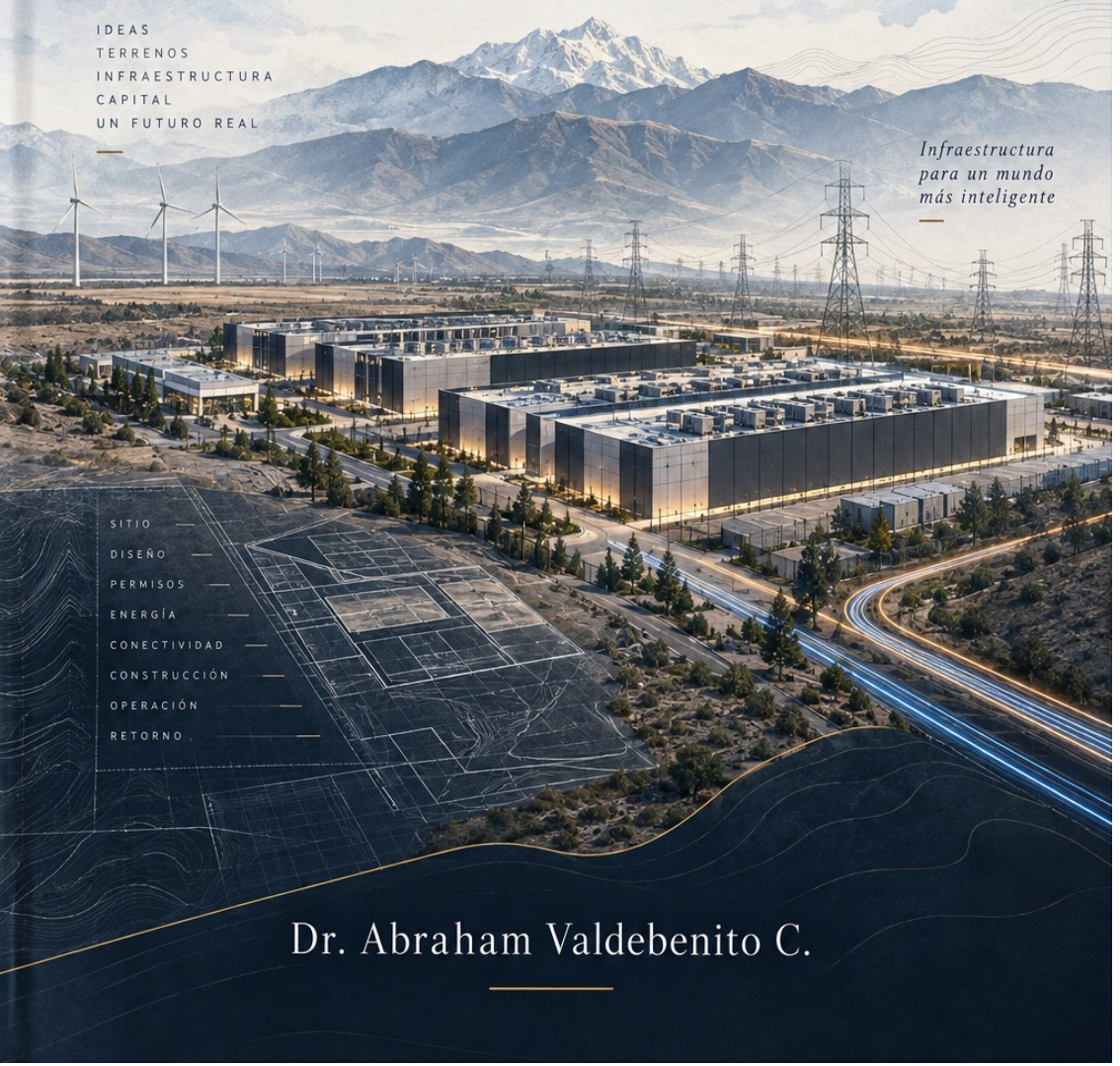
TERRITORIO
ENERGÍA
DATOS
VALOR

DEL TERRENO AL CONTRATO HYPERSCALE

Manual del inversionista

IDEAS
TERRENOS
INFRAESTRUCTURA
CAPITAL
UN FUTURO REAL

Infraestructura para un mundo más inteligente



Dr. Abraham Valdebenito C.

CENTROS DE DATOS · ENERGÍA · CONECTIVIDAD

Del terreno al contrato hyperscale

Manual del inversionista para desarrollar un campus de centros de datos competitivo

Energía, conectividad, resiliencia y MW facturable

Cómo evaluar la preparación, la ventaja competitiva y el retorno de un campus.

CASO CONDUCTOR · CAMPUS HORIZONTE · 500 MW IT

Energía firme → conectividad diversa → capacidad IT probada → servicio facturable

Dr. Abraham Valdebenito C.

Edición revisada y ampliada · Noviembre de 2026

elecnor

INFRAESTRUCTURA DIGITAL

La pregunta que ordena la inversión

Un proyecto puede anunciar cientos de megavatios sin estar en condiciones de entregar potencia a un cliente. Entre la cifra comercial y un servicio facturable hay una secuencia de pruebas: terreno y permisos, conexión y potencia firme, capacidad para TI, refrigeración, conectividad física, contratos, aceptación y operación. La pregunta que abre este libro es directa: ¿qué parte de esa capacidad estará realmente disponible, en qué fecha y con qué evidencia?

A lo largo de 26 capítulos y seis partes, el lector sigue el activo desde la red eléctrica hasta el rack, la interconexión, el cliente y la factura. El recorrido sirve a quien evalúa, invierte, desarrolla, opera o dirige centros de datos, y convierte decisiones técnicas en preguntas de plazo, costo, servicio e ingresos.

El Modelo AVC de las Siete Puertas ordena la decisión de capital. La auditoría de bancabilidad física y comercial sigue cada bloque de MW, identifica dependencias compartidas y traduce brechas a calendario, CAPEX, ingresos, SLA y valor del activo. La conectividad —fibra, rutas, interconexión, latencia y recuperación— forma parte de esa evaluación. Las herramientas orientan la diligencia, pero no sustituyen ingeniería, análisis financiero, asesoría legal, permisos ni diseño profesional.

La obra integra energía, redes de fibra, AI Factory, cables submarinos y descentralización [43], y contrasta sus criterios con normas, organismos técnicos, documentación pública de operadores y guías sectoriales [1–74]. El texto, los casos y los esquemas se redactaron para esta edición. Las cifras, proyectos y estados de infraestructura llevan fecha y fuente: una proyección global, por sí sola, no demuestra la viabilidad de un emplazamiento concreto.

Caso conductor: Campus Horizonte, 500 MW IT

Campus Horizonte es un caso hipotético para seguir la decisión de inversión desde el primer anuncio hasta la aceptación del servicio. No representa un predio real, una conexión eléctrica disponible ni un contrato conseguido.

El concepto reúne 500 MW IT netos en cinco bloques de 100 MW. La secuencia por bloques permite condicionar cada inversión a evidencia nueva; no convierte la suma anunciada en potencia firme ni en capacidad disponible para un cliente.

Un comprador hyperscale revisaría cada bloque por energía firme y fecha, solución térmica y agua, capacidad durante mantenimiento, MMR y rutas de fibra físicamente diversas, latencia y capacidad bajo contingencia, commissioning, operación, contratos y costo total. Energía y conectividad sostienen el servicio con la misma criticidad: perder cualquiera puede impedir la entrega acordada.

Para dimensionar la conversación de capital, un supuesto de US$11 millones por MW arroja US$5.500 millones de CAPEX de infraestructura para 500 MW; aplicar como sensibilidad el rango público de US$8,6–12 millones por MW daría US$4.300–6.000 millones. Las fronteras y los denominadores publicados no son homogéneos, por lo que esta multiplicación no constituye un presupuesto. El cálculo es una referencia de prefactibilidad, no el costo total del proyecto; equipos de cómputo, conexión externa, terreno, financiamiento y otros conceptos se modelan aparte [68, 69].

Campus Horizonte aparece progresivamente como expediente de aprendizaje: demanda y puertas de inversión (parte I), sitio, potencia y refrigeración (parte II), rutas y productos de conectividad (partes III y IV), pruebas y operación (parte V), y resolución económico-contractual (parte VI). Cada registro

distingue hechos hipotéticos, supuestos del modelo y evidencias aún no disponibles. Los ejercicios independientes de 120 y 240 MW y Campus Aurora (360 MW) sirven para practicar otras decisiones; no son fases del Campus Horizonte.

Prólogo: antes de comprometer capital

Una cifra de potencia solo empieza a ser comercialmente útil cuando identifica el punto de conexión, la capacidad firme, la fecha, las obras requeridas, el costo y el responsable. Puede describir una aspiración, una reserva preliminar, capacidad bruta del terreno o carga IT que todavía no se puede entregar. Para invertir con criterio hay que distinguir esas situaciones y pedir evidencia para cada hito.

La misma disciplina sirve a quien ya opera. Una sala llena de equipos no garantiza que el negocio esté protegido: un cliente puede depender de dos operadores que usan la misma ruta; una planta puede tener redundancia en el diagrama y un control común que la invalide; una expansión puede consumir el margen eléctrico o térmico que sostiene el servicio actual. En ambos momentos, el lector necesita conectar promesas con activos, contratos, pruebas y responsables.

Este libro sigue la vida del activo en orden. Primero enseña a evaluar su lógica comercial y sus riesgos; luego convierte esa tesis en requisitos de sitio, edificio, energía, refrigeración y seguridad; después diseña las redes y rutas; finalmente demuestra cómo aceptar, operar, medir, mantener y mejorar el servicio. El propósito no es acumular siglas. Es aprender a leer el sistema, reconocer una brecha y decidir qué hacer con ella.

La experiencia que guía estas páginas procede de más de dos décadas en telecomunicaciones e infraestructura digital, incluida la fibra óptica, la planta externa, redes terrestres y la conectividad de centros de datos. La contribución del autor está en hacer visibles las interfaces entre disciplinas y convertir una promesa comercial en una arquitectura, una prueba y una condición operacional que se pueda seguir.

Ruta progresiva del concepto al comité de inversión

El índice organiza el trabajo por fases del activo. Para aprender el sistema como un manual, puede seguirse este recorrido, que une los capítulos y herramientas cuando el lector necesita ver un tema completo de principio a fin.

01 **1. Comprender qué es infraestructura digital y qué tipos de centros existen**

Mapa de capas, tipologías, roles y servicio que se ofrece

CAPÍTULOS Y HERRAMIENTAS · 1 y 9

02 **2. Seguir cómo funciona el centro por dentro**

Recorrido de energía y refrigeración hasta el rack, controles y red de IA

CAPÍTULOS Y HERRAMIENTAS · 9–14 y 21

03 **3. Entender cómo se conecta**

Requisitos, latencia, carriers, fibra, rutas terrestres y acceso submarino

CAPÍTULOS Y HERRAMIENTAS · 5, 15–21 y 23; Toolkit B, C, F y N

04 **4. Diseñar y desarrollar el activo**

Sitio, permisos, potencia, agua, construcción, aceptación y commissioning

CAPÍTULOS Y HERRAMIENTAS · 9–14, 16–19, 22 y 24; Toolkit A, D, I, M y O

05 **5. Dirigir, operar, mantener y recuperarse**

Turnos, monitoreo, seguridad, continuidad, incidentes y revisión ejecutiva

CAPÍTULOS Y HERRAMIENTAS · 14, 22 y 24–25; Toolkit E, G, I, Q y S

06 **6. Entender el negocio**

Cliente, modelo comercial, contrato, utilización, ingresos y expansión

CAPÍTULOS Y HERRAMIENTAS · 2–4, 7 y 26; Toolkit L y R

07 **7. Analizar la inversión**

CAPEX, OPEX, flujo de caja, financiamiento, escenarios y retorno

CAPÍTULOS Y HERRAMIENTAS · 5–7 y 26; Toolkit J, K, L, P y R

08 **8. Ejecutar la debida diligencia**

Evidencia y condiciones precedentes antes de comprometer capital

CAPÍTULOS Y HERRAMIENTAS · 5–6, 10–14, 17 y 26; Toolkit A, I, L, O y P

09 **9. Prepararse para dirigir un centro de datos**

Mandato del puesto, tablero, gobierno de incidentes y plan de los primeros 90 días

CAPÍTULOS Y HERRAMIENTAS · 24–26; Toolkit E, G, Q, R y S

El expediente integrador Campus Aurora es un segundo caso hipotético para aplicar el recorrido. Sus diagramas muestran interfaces y rutas; sus listas de verificación y matrices dejan un registro para solicitar evidencia o asignar una acción.

Qué podrá hacer el lector al terminar

Al completar la ruta principal, el lector podrá:

1. Explicar qué activo se está financiando, construyendo, adquiriendo u operando y qué servicio produce.
2. Distinguir entre demanda anunciada, intención comercial, compromiso contractual, capacidad energizada y capacidad efectivamente facturable.
3. Evaluar una oportunidad con las Siete Puertas de Viabilidad y señalar las condiciones que impiden comprometer capital irreversible.
4. Preparar un modelo de capacidad, ingresos, costos, calendario y riesgos con escenarios base, adverso y favorable.
5. Revisar el alcance de las decisiones de terreno, potencia, refrigeración, agua, protección, conectividad y operación sin confundir sus fronteras.

6. Formular un paquete de due diligence, una matriz de interfaces, requisitos de aceptación y preguntas para asesores, proveedores y clientes.
7. Seguir la capacidad desde la conexión eléctrica y la ruta de fibra hasta el rack, el servicio y sus indicadores.
8. Preparar un memorando de decisión que exponga evidencia, supuestos, brechas, mitigaciones, responsables y siguiente hito.
9. Leer una arquitectura de AI Factory y distinguir los dominios de cómputo, red, energía, refrigeración, almacenamiento y conectividad externa.
10. Evaluar un corredor internacional hasta el cliente, separando cable submarino, backhaul terrestre, estación de amarre, interconexión y ruta de recuperación.
11. Dirigir una revisión ejecutiva que reúna capacidad, servicio al cliente, energía, facility, conectividad, finanzas, seguridad y personas.
12. Preparar un tablero, una agenda de gestión y un plan de entrada de 90 días para asumir la conducción del activo con evidencia y responsables claros.

El dominio que ofrece el libro es ejecutivo: comprender el activo completo, conducir la revisión de desempeño, asignar responsables, exigir pruebas, priorizar capital y comunicar decisiones con especialistas. El director responde por el sistema y sus resultados; los profesionales habilitados conservan la autoridad técnica que les corresponde en diseño, maniobras, seguridad, cumplimiento y certificación. El lector termina con un método para evaluar una inversión y con herramientas para dirigir su operación sin confundir responsabilidad de negocio con aprobación técnica especializada.

El Modelo AVC de las Siete Puertas de Viabilidad

El Modelo AVC traduce una tesis de inversión en siete puertas con evidencia y consecuencias para el capital: 1) demanda y contratos; 2) terreno, derechos y permisos; 3) energía disponible, fecha y costo; 4) conectividad y diversidad física; 5) diseño y modelo operativo, incluidos capacidad, refrigeración, agua, clima, seguridad y personal; 6) construcción, suministro, CAPEX, calendario y commissioning; y 7) retorno, financiación, riesgo y salida. Cada puerta es una decisión documentada, no una nota abstracta.

AVC designa el marco de decisión que articula esta obra. Su instrumento central son las Siete Puertas de Viabilidad, que ordenan la decisión de inversión. Five Readiness realiza el cribado inicial del sitio; Fiber Readiness Score y TRACE-DC profundizan la verificación de conectividad. Las matrices de evidencia, riesgo, aceptación e inversión convierten los hallazgos en responsables, hitos y condiciones. Cada herramienta corresponde a una etapa: no son escalas intercambiables ni generan una aprobación automática.

Cada puerta se clasifica como **demostrada**, **condicionada**, **en investigación** o **no demostrada**. Un proyecto no obtiene luz verde por promediar siete notas si una condición crítica sigue abierta. La decisión puede ser avanzar, avanzar con condiciones y presupuesto acotado, mantener una opción mientras se obtiene evidencia, rediseñar o detenerse. Cada estado debe declarar quién verifica, qué documento o prueba sirve, cuándo vence y qué consecuencia tiene incumplir el hito.

El método organiza el juicio; no pretende convertir una evaluación compleja en un puntaje universal. En cada puerta, la evidencia debe incluir fuente, versión, fecha, responsable y condición de vigencia. Una restricción legal, una conexión eléctrica sin fecha,

una ruta compartida presentada como diversa o una demanda sin cliente identificable pueden cambiar la decisión aunque otras áreas estén avanzadas.

Five Readiness como filtro inicial

El marco Five Readiness sirve para una primera lectura de un terreno antes de encargar diseño detallado. Pregunta si existe evidencia inicial sobre cinco condiciones: **Site** (sitio construible y escalable), **Power** (potencia alcanzable), **Fiber** (rutas de fibra activables), **Permit** (camino regulatorio y de permisos) y **Market** (clientes y demanda defendibles). Su función es filtrar y ordenar preguntas; no sustituye la evaluación completa.

Five Readiness	Puerta desarrollada en este libro	Pregunta de salida
Site	Terreno, permisos y parte de capital y entrega	¿Se controla un sitio apto, con acceso, estudios y permisos posibles?
Power	Energía	¿Existe una ruta plausible a capacidad, costo y fecha documentados?
Fiber	Conectividad	¿Hay operadores, rutas, capacidad y acceso físico demostrables?
Permit	Terreno y permisos; capital y entrega	¿Qué autorizaciones y obras condicionan la fecha de servicio?
Market	Demanda e ingresos	¿Quién contrataría qué producto, bajo qué condiciones y calendario?

Las cinco dimensiones del filtro se despliegan en las Siete Puertas de Viabilidad. La puerta de diseño y operación integra refrigeración, agua, clima, seguridad, capacidad y personas; la de construcción incorpora contratos de entrega, suministros, pruebas

y aceptación; la de retorno reúne financiación y salida. Un sitio puede superar el cribado inicial y seguir sin estar listo para comprometer construcción. Esta relación permite usar Five Readiness como filtro sin crear dos métodos de aprobación que compitan entre sí [43].

Auditoría de bancabilidad física y comercial

La pregunta central es si el proyecto puede convertir cada bloque de capacidad en un servicio que cumpla la misión del cliente y genere los ingresos previstos. La auditoría fija primero la unidad: fase, métrica —MW de conexión, de facility o IT—, frontera física, escenario de operación y fecha de corte. Solo después compara cifras y documentos. Dos cantidades con la misma unidad no son comparables si describen fronteras, fechas o condiciones distintas.

La prueba física, la ruta de conectividad y el contrato se llevan como trazas paralelas: se pueden contratar bloques antes de construirlos, y algunos contratos permiten cobrar reservas antes de la aceptación física. Por eso, el libro separa capacidad demostrable, capacidad contratada, MW que han cumplido el hito de facturación, importe facturado y caja cobrada. Un cobro anticipado o una obligación de pago por reserva no convierte capacidad aún no entregada en MW físicamente disponibles.

Resultado de la auditoría	Qué debe mostrar el expediente
MW demostrables	Capacidad en una frontera, fase, fecha y escenario definidos, respaldada por documentos y pruebas; distingue potencia eléctrica, facility y MW IT
Dependencias expuestas	Elementos que pueden fallar juntos entre energía, edificio, territorio, transporte, interconexión, relaciones comerciales y operación
Impacto económico	Cambio posible en fecha, CAPEX, MW utilizables o facturables, ingresos, créditos SLA, costos de recuperación y valor del activo

La ficha de auditoría asigna a cada afirmación un estado, fuente, emisor, versión, fecha, vencimiento, responsable de validación y consecuencia si no se cumple. Cuando no existe medición o evidencia suficiente, el resultado se declara condicionado o no demostrado; no se completa con una cifra de mercado ni con una ruta dibujada. La estimación económica se construye por escenarios y con los términos contractuales reales, sin sumar dos veces la misma pérdida.

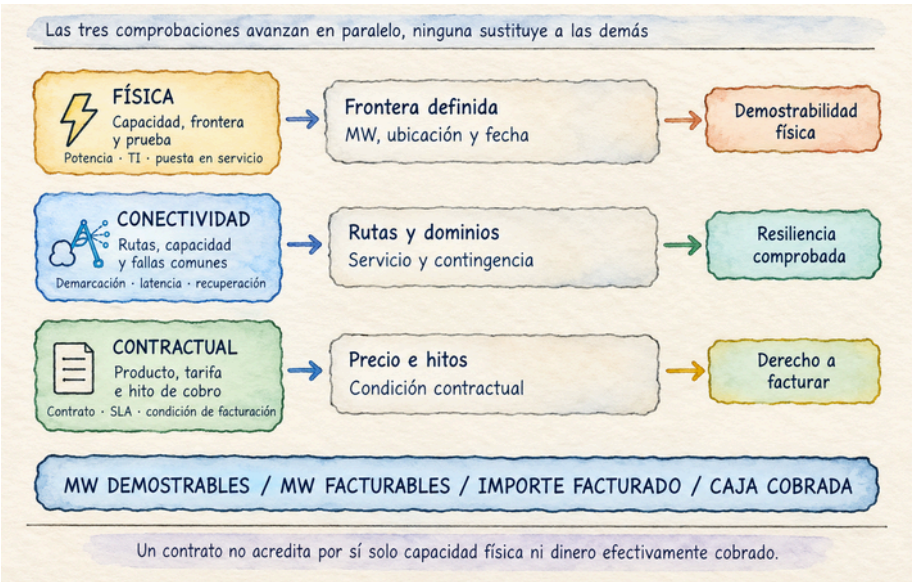


Figura 1. Tres trazas para auditar el MW facturable

Lectura. Cada bloque se revisa en paralelo: capacidad física y pruebas; conectividad, dominios compartidos y servicio; y condición contractual de facturación. La fecha de corte permite separar MW demostrables, MW con hito de cobro cumplido, importe facturado y caja recibida. La facturabilidad depende del contrato; la capacidad operable y la exposición física requieren pruebas propias.

La tesis de conectividad verificable

La conectividad resiliente no se demuestra contando carriers, cables o entradas al edificio. Se demuestra siguiendo el servicio extremo a extremo: la infraestructura permite un comportamiento esperado; las pruebas registran ese comportamiento bajo carga y falla; la operación conserva la evidencia y corrige las brechas; esa

evidencia sostiene continuidad, ingresos y valor del activo. La secuencia que recorre el libro es **Infraestructura → Comportamiento → Evidencia → Valor**.

Cómo aprender y usar el libro

Cada capítulo se conecta con una capacidad de trabajo. Primero se explica el principio; después se identifica el riesgo, la evidencia que puede demostrarlo y su consecuencia económica. Los recuadros de Campus Horizonte sirven de hilo conductor, mientras los ejercicios de 120, 240 y 360 MW son independientes. El lector puede abordar cada área por separado o seguir la progresión: concepto → caso → evidencia → decisión. El término «centro de datos» es el preferido en la narración; los nombres comerciales y términos técnicos en inglés se conservan cuando facilitan la precisión y se explican en el glosario.

01 **Inversionista, fondo o prestamista**
Memorando de inversión y lista de condiciones precedentes
PARTES RECOMENDADAS · I, II y V; Toolkit A, J, K, L, O y R

02 **Desarrollador o dueño del activo**
Plan de desarrollo, interfaces, aceptación y operación
PARTES RECOMENDADAS · I a VI

03 **Ingeniería, diseño o construcción**
Requisitos coordinados, matriz de pruebas y transferencia
PARTES RECOMENDADAS · II a V y Toolkit B, D, I, M y O

04 **Operador, facility o NOC**
Indicadores, rutas de escalamiento y plan de continuidad
PARTES RECOMENDADAS · II, III, V y Toolkit E, F, G, I y O

05 **Conectividad, carrier o asesor**
Arquitectura trazable, SLA y evidencia de resiliencia
PARTES RECOMENDADAS · III a VI y Toolkit B, C, D, F, G y N

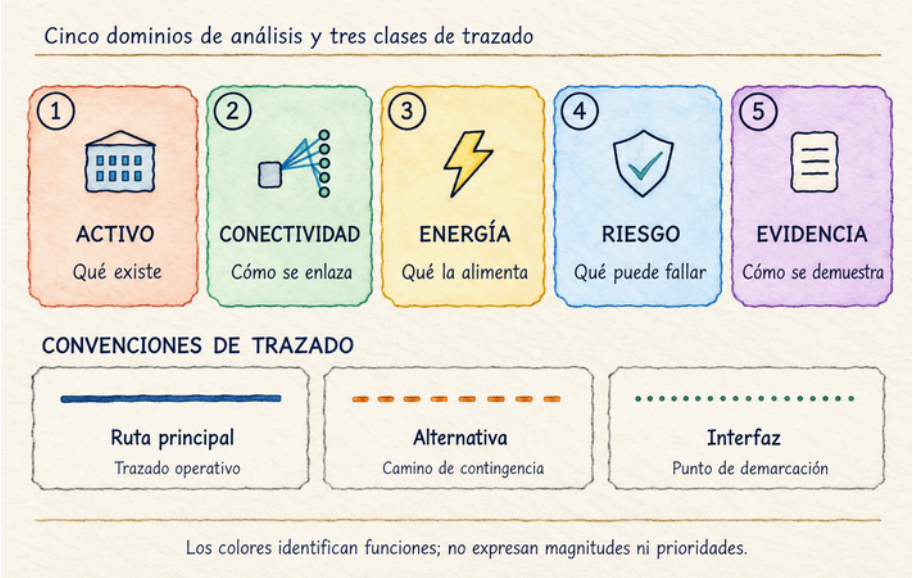


Figura 2. Cómo leer la gramática visual de esta obra

Lectura. Los colores ayudan a localizar el dominio principal: azul para activo y servicio, turquesa para conectividad, cobre para energía, coral para riesgo y gris para evidencia o control. La flecha continua representa el camino principal del esquema; la discontinua indica alternativa o contingencia; la línea punteada marca una interfaz o frontera que debe comprobarse. El código identifica funciones, no magnitudes ni prioridades.

Guía rápida para el inversionista no especialista

Para leer este manual no es necesario diseñar una subestación o configurar un router. Sí es necesario distinguir qué cifra está comprometida, qué infraestructura la sostiene, qué evento puede interrumpirla y qué documento o prueba la respalda. El glosario completo se encuentra en el Toolkit H.

Una ruta de lectura sencilla sigue el mismo servicio de extremo a extremo: territorio y energía → edificio, refrigeración y seguridad → red y acceso a nubes → aceptación → contrato → factura y caja. En los capítulos, «evidencia» no significa certeza absoluta: significa un documento, medición o prueba suficiente para la decisión y fecha declaradas.

Término	Lectura para decidir	Qué no debe confundirse
MW IT	Potencia utilizable por equipos de TI	Con MW de conexión eléctrica
PUE	Relación de energía total del centro / energía TI	Con rentabilidad, agua o disponibilidad
CAPEX / OPEX	Inversión / gasto recurrente	Con flujo de caja libre
MMR / DCI	Sala de interconexión / enlace entre centros	Con independencia física por sí solos
SLA / RTO / RPO	Servicio pactado / recuperación en tiempo / punto de datos	Con una prueba de resiliencia ya completada
VAN / TIR / DSCR	Valor actual / retorno / cobertura de deuda	Con una recomendación automática de inversión
BESS / UPS / CDU	Baterías de almacenamiento / respaldo inmediato / unidad de distribución térmica	Con equipos equivalentes o intercambiables

Atajo de lectura: primero identifique la unidad (MW IT, kW, MWh o US$), luego la fecha, la frontera física, el estado contractual y la evidencia. Si falta uno, la comparación puede inducir a error.

Mapa de competencias

Capítulo	Al terminar, el lector podrá…
1	Definir la infraestructura digital, sus capas y la función del centro de datos dentro del servicio.
2	Describir el activo, sus propietarios, fronteras, derechos y capacidad que se financia y opera.
3	Comparar modelos de negocio, clientes, fuentes de ingreso y obligaciones contractuales.
4	Separar mercado potencial, demanda verificable y capacidad vendible.

Capítulo	Al terminar, el lector podrá…
5	Mapear rutas internacionales, cables submarinos, backhaul, interconexión y oportunidades en Chile.
6	Aplicar las Siete Puertas de Viabilidad y convertir brechas en condiciones para decidir capital.
7	Construir un modelo financiero por fases y probar CAPEX, OPEX, ingresos, calendario y retorno.
8	Planear adquisiciones, transformación y gestión del activo durante su ciclo de vida.
9	Explicar el centro de datos como sistema crítico y seguir sus dependencias.
10	Elegir tipología y dimensionar capacidad, disponibilidad y carga útil.
11	Evaluar terreno, edificio, accesos, zonas y reserva para expansión.
12	Seguir la potencia desde la conexión hasta el rack y distinguir MW, MVA, cargas y respaldo.
13	Dimensionar refrigeración y controlar el desempeño térmico, el agua y la carga densa.
14	Organizar protección, monitoreo, alarmas, seguridad y operación del facility.
15	Traducir las aplicaciones y el contrato del cliente en requisitos de conectividad.
16	Definir presupuestos de latencia, pérdida y capacidad con mediciones reproducibles.
17	Demostrar que el sitio podrá conectarse con rutas y capacidad disponibles en la fecha requerida.
18	Trazar la ruta desde la calle y los ductos hasta la demarcación y la MMR.
19	Especificar, probar y mantener la fibra y la planta óptica.
20	Evaluar carriers, interconexión, BGP y DCI según servicio, ruta y SLA.

Capítulo	Al terminar, el lector podrá…
21	Diseñar los planos de red de una AI Factory y sus interfaces con cómputo y almacenamiento.
22	Identificar causas comunes de falla, capacidad sobreviviente y plan de recuperación.
23	Relacionar latencia y desempeño con la misión, ubicación y economía del servicio.
24	Diseñar commissioning con pruebas integradas y criterios de aceptación verificables.
25	Dirigir la operación, asignar responsabilidades y revisar servicio, riesgos, clientes y resultados.
26	Auditar MW demostrados y traducir brechas a capacidad facturable, plazos, ingresos y valor.

Índice

Parte I · Evaluar la inversión **22**

1. Qué es la infraestructura digital: el sistema detrás del servicio 22
2. El activo digital que se compra, construye y opera 31
3. Modelos de negocio: quién paga por qué 36
4. Demanda, mercado y ruta hacia los ingresos 40
5. Rutas internacionales, cables submarinos y lectura de Chile 48
6. Siete puertas para decidir si un proyecto es viable 63
7. El caso de inversión: capacidad, costos y escenarios 68
8. Adquirir, transformar y gestionar activos durante su vida 77

Parte II · Diseñar el activo crítico **82**

9. El centro de datos como sistema crítico 82
10. Tipologías, capacidad y disponibilidad 89
11. Sitio, edificio y distribución física 96
12. La cadena de potencia: de la red al rack 101
13. Refrigeración, control térmico y alta densidad 113
14. Protección, monitoreo y operación del facility 125

Parte III · Diseñar el servicio digital **135**

15. El centro de datos es un nodo de una ruta 135
16. De la carga digital al presupuesto de conectividad 140
17. El sitio conectado se demuestra antes de construir 144

Índice y herramientas

Parte IV · Conectar el centro al ecosistema digital **152**
18. De la calle a la MMR 152
19. Ingeniería de fibra y planta óptica 157
20. Carriers, interconexión y DCI 163
21. La red interna de la inteligencia artificial 172

Parte V · Probar, operar y preservar valor **182**
22. Resiliencia física y fallas compartidas 182
23. Latencia y desempeño como variables de negocio 194
24. Commissioning: convertir el diseño en evidencia 202
25. Dirigir y operar el centro de datos conectado 208

Parte VI · Auditar el MW facturable **231**
26. Del MW anunciado al MW facturable 231

Toolkit de campo y herramientas A a T **250**
U Aplicación documental a una vía de conexión en Chile 286
V Ejemplo resuelto desde la aceptación hasta el primer cobro 291
W Soluciones comentadas de ejercicios clave 295
X Reglas para actualizar evidencia y decidir 298
Y Uso de las herramientas editables y actualización 300
Z Índice analítico 302

Referencias normativas y técnicas **305**
Nota final y sobre el autor 316

Parte I · Evaluar la inversión

Esta parte comienza por definir el sistema que hace posible los servicios digitales y después enseña a identificar qué componente se financia, cómo puede producir ingresos, qué evidencia justifica la demanda y qué condiciones deben cerrarse antes de elevar el compromiso de capital. Una oportunidad pasa de una hipótesis a un proyecto cuando sus dependencias se vuelven verificables.

1. Qué es la infraestructura digital: el sistema detrás del servicio

Objetivo del capítulo: explicar qué significa infraestructura digital, distinguir sus capas y describir cómo una falla física puede propagarse hasta afectar a una persona, una empresa o un servicio público.

Una definición útil para decidir

La infraestructura digital es el conjunto coordinado de activos físicos, plataformas técnicas, reglas de operación, capacidades humanas y acuerdos que permiten crear, transportar, almacenar, procesar, proteger y entregar información digital. Incluye equipos y edificios, pero también rutas, energía, software de control, interconexión, contratos, permisos, seguridad, personal y mecanismos para recuperar el servicio. Su unidad práctica no es el cable ni el edificio aislado: es la capacidad de prestar una función digital con el nivel de continuidad, rendimiento, seguridad y costo que necesita quien la usa.

No existe una denominación única que todos los países, operadores y marcos apliquen de la misma manera. Por eso, este libro adopta una definición operacional: considera el sistema extremo a extremo y sigue sus dependencias desde el territorio y la energía hasta la aplicación y el usuario. La taxonomía técnica de la UIT para conectividad internacional, por ejemplo, distingue

componentes físicos y describe una capa menos visible de regulación, gobernanza de datos, ciberseguridad y calidad de servicio; sirve como mapa conceptual, no como una norma universal para clasificar todo activo digital [44]. El Banco Mundial también trata los centros de datos, la energía fiable, la banda ancha, la regulación, las capacidades y la portabilidad como piezas que condicionan el desarrollo de mercados de nube y datos [45].

La definición evita dos errores. El primero es llamar infraestructura digital solo a telecomunicaciones: sin cómputo, almacenamiento, energía, refrigeración, software y operación, la red no produce el servicio final. El segundo es tratar un centro de datos como si fuera todo el sistema: es un nodo de cómputo y almacenamiento conectado a redes de acceso, transporte e intercambio, que depende de servicios físicos y humanos fuera de su perímetro.

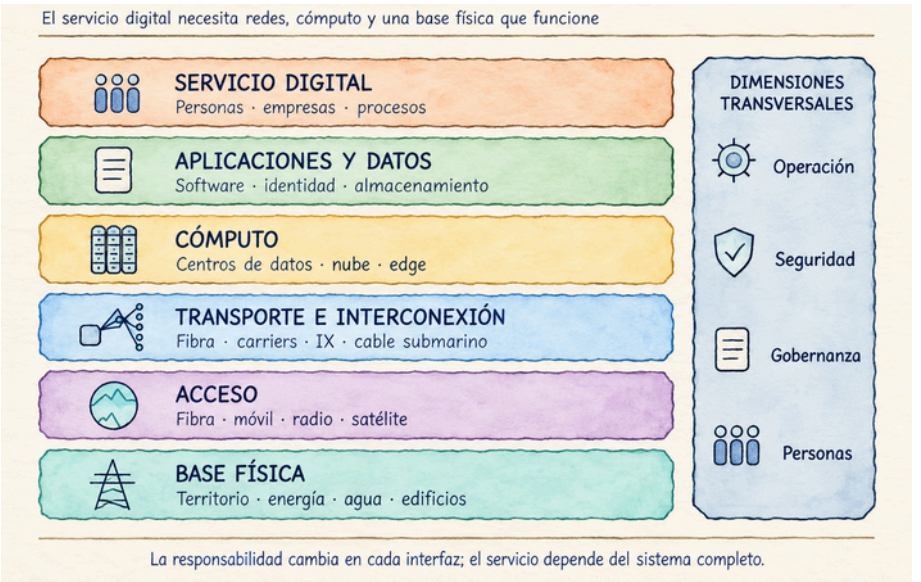


Figura 3. Infraestructura digital como sistema de capas y dependencias

Lectura. El servicio que usa una persona atraviesa acceso, transporte, interconexión, cómputo y aplicaciones. El territorio y la energía alimentan la infraestructura, mientras operación, seguridad, contratos y talento cruzan las capas. La frontera de responsabilidad cambia en cada interfaz.

Las capas se entienden mejor siguiendo un dato

Una solicitud de una aplicación puede originarse en un dispositivo, pasar por una red local y una red de acceso, atravesar fibra metropolitana o backbone, cruzar un punto de intercambio o una red privada, llegar a un centro de datos, consultar almacenamiento o cómputo, y volver por una ruta que no necesariamente coincide con la de ida. Si el contenido está en caché o la función se ejecuta en el borde, parte del recorrido cambia. La experiencia resulta de todas las capas y de sus límites contractuales.

Capa	Componentes típicos	Pregunta de continuidad y valor
Dispositivo, aplicación y usuario	Terminal, sensores, software, identidad, interfaces y datos	¿Qué función debe completarse y qué demora o interrupción tolera?

Capa	Componentes típicos	Pregunta de continuidad y valor
Acceso	LAN, Wi-Fi, redes móviles, fibra de acceso, radio o satélite	¿Puede el usuario entrar a la red con capacidad, cobertura y seguridad suficientes?
Transporte terrestre	Fibra metropolitana, ductos, postes, estaciones, PoP y backbone	¿Qué rutas transportan el tráfico y qué activos comparten?
Transporte internacional	Cables submarinos, estaciones de amarre, backhaul, satélite y gateways	¿Cómo se alcanza otra región y cuánto tarda la restauración ante una falla?
Interconexión	Carrier, peering, IXP, cross-connect, nube y DCI	¿Dónde cambia de red el tráfico, bajo qué contrato y con qué política?
Cómputo y almacenamiento	Centro de datos, cloud, edge, AI Factory, servidores y almacenamiento	¿Dónde se ejecuta la función, qué capacidad está realmente disponible y quién la opera?
Soporte físico	Electricidad, subestaciones, respaldo, refrigeración, agua, incendio y edificio	¿Qué servicios habilitan el funcionamiento y qué margen queda bajo contingencia?
Control y confianza	BMS, EPMS, DCIM, NOC, SOC, identidad, telemetría y respuesta	¿Cómo se conoce el estado, quién decide y cómo se recupera el servicio de forma segura?
Instituciones y capacidades	Permisos, regulación, servidumbres, contratos, especialistas y gobierno	¿Quién autoriza, mantiene, financia y responde por cada dependencia?

La tabla no implica que todos los componentes pertenezcan a la misma empresa. La infraestructura digital se forma mediante activos conectados que pueden pertenecer a entidades diferentes y que tienen demarcaciones distintas. La responsabilidad del

proveedor termina donde lo establece su contrato; la dependencia técnica puede continuar más allá. El análisis de resiliencia debe seguir el trayecto real y sus puntos de transferencia, no detenerse en la frontera de la factura.

Infraestructura física, plataformas y servicios públicos digitales

En la conversación de políticas públicas aparece también el término infraestructura pública digital. Suele referirse a sistemas comunes que permiten prestar servicios a escala, como identidad digital, pagos, intercambio de datos o credenciales; la definición y el alcance dependen del marco nacional. No debe confundirse con la infraestructura física digital descrita en este libro. Una plataforma de identidad necesita software, datos y gobernanza, y a la vez depende de centros de datos, redes, energía, seguridad y operación para estar disponible. Ambas capas se necesitan y deben diseñarse juntas, pero son objetos de inversión y responsabilidad distintos.

El cliente compra un resultado, no un inventario. Un hospital busca continuidad de historias clínicas, imágenes y coordinación; una entidad financiera necesita transacciones íntegras, baja latencia y recuperación; una empresa SaaS requiere elasticidad, portabilidad y operación predecible; un proveedor de IA busca aceleradores, energía, refrigeración líquida, red de alto rendimiento y utilización; un operador de telecomunicaciones necesita capacidad, rutas, interconexión y restauración. El mismo edificio puede alojar servicios con requisitos diferentes, y un cliente puede combinar varios centros, nubes, carriers y redes privadas.

Cliente o carga	Qué suele comprar	Evidencia que permite verificarlo
Empresa y SaaS	Colocation, cloud, conectividad, copias y recuperación	SLO, capacidad, costo total, portabilidad y prueba de restauración

Cliente o carga	Qué suele comprar	Evidencia que permite verificarlo
Hyperscaler o nube	Bloques de capacidad, energía, ubicación, escalamiento y conectividad	MW energizados, cronograma, superficies disponibles, contratos y rutas
IA y cómputo acelerado	Aceleradores, densidad, red interna, enfriamiento, potencia y rendimiento	Aceptación de carga, consumo medido, throughput del clúster y utilización
Finanzas, salud y servicios esenciales	Continuidad, seguridad, trazabilidad, ubicación y tiempo de recuperación	Pruebas de continuidad, controles, registros, contratos y cumplimiento aplicable
Carrier, contenido y plataformas	PoP, interconexión, caché, tránsito y rutas a clientes	Demanda agregada, diversidad física, latencia, capacidad y reglas de acceso

Una categoría comercial no es por sí sola una garantía técnica. “Cloud”, “edge”, “AI Factory”, “carrier neutral” o “Tier” describen un modelo, una ubicación o un programa de evaluación; el comprador debe traducirlos en capacidad, demarcaciones, obligaciones, pruebas y derecho de recuperación.

Energía y conectividad son dependencias que cruzan todas las capas

La energía hace posible que los centros de datos, nodos de red, repetidores, estaciones de amarre, sistemas de enfriamiento y controles funcionen. Puede venir de una red eléctrica, contratos de suministro, generación renovable, almacenamiento y respaldo con combustibles. La ruta energética se analiza por conexión, firmeza, disponibilidad horaria, costos, emisiones, permisos, riesgos climáticos y comportamiento durante una falla. Una declaración anual de energía renovable no demuestra por sí sola que exista potencia firme en la hora en que el sistema la necesita.

La conectividad vincula usuarios, centros de datos, regiones, nubes, proveedores y sistemas de gestión. No es redundante por el mero hecho de tener varios contratos. La prueba sigue el cable, ducto, puente, cámara, edificio, PoP, estación de amarre, frontera y equipo de terminación; después verifica capacidad y conmutación en el punto que limita el servicio. Los cables submarinos son parte de esta infraestructura internacional, pero su resiliencia depende también del backhaul terrestre, la estación de amarre y las rutas alternativas. La UIT destaca tanto la importancia sistémica de estos sistemas como el costo de la diversidad y la exposición a fallas compartidas [44, 57].

Una falla puede cruzar varias capas

Un corte de fibra puede producir pérdida de capacidad; la congestión desplaza tráfico a rutas alternativas; las rutas alternativas pueden atravesar un mismo PoP o una región distinta; la latencia o pérdida resultante puede afectar una transacción; el cliente abre un incidente; y los equipos necesitan identificar el tramo físico y coordinar a varios operadores. Una perturbación eléctrica puede reiniciar equipos ópticos o controladores de red; un problema de identidad puede bloquear el acceso a herramientas aunque los servidores y enlaces continúen encendidos. Cada secuencia muestra por qué “el centro de datos está arriba” no equivale a “el servicio funciona”.

Pregunta de análisis	Capa que ayuda a responder	Evidencia mínima
¿Qué servicio recibe el usuario?	Aplicación y contrato	SLO, experiencia y función de negocio
¿Qué infraestructura lo soporta?	Red, cómputo y facility	Inventario, dependencias y límites

Pregunta de análisis	Capa que ayuda a responder	Evidencia mínima
¿Qué pasa si se pierde un elemento?	Resiliencia	Capacidad sobreviviente, failover y ruta alternativa
¿Quién puede actuar?	Operación y gobierno	RACI, accesos, escalamiento y acuerdos de asistencia
¿Cómo se sabe que volvió?	Observabilidad y aceptación	Prueba, telemetría, comunicación y cierre auditable

Un vocabulario de distancias ayuda a localizar la brecha

El informe terminológico de un grupo focal de la UIT presenta el recorrido de conectividad con las nociones de primera, última y milla invisible, junto con segmentos de transporte internacional y nacional. En su descripción, la capa invisible comprende gobernanza, regulación, ciberseguridad y calidad de servicio que habilitan la infraestructura física [44]. El libro usa esta idea como recurso pedagógico: el lector puede preguntar si falta cobertura al usuario, transporte, salida internacional, interconexión, capacidad de centro de datos o un marco de operación. No asume que la terminología tenga una definición normativa común en todos los mercados.

El perímetro correcto depende de la decisión

Para comprar un campus se revisan terreno, energía, permisos, agua, fibra, contratos, crecimiento, proveedores y calendario. Para contratar colocation se revisan potencia útil, densidad, refrigeración, MMR, seguridad y salida del servicio. Para adquirir un carrier se analiza planta externa, ocupación, servidumbres, derechos de uso, mantenimiento, contratos mayoristas y activos compartidos. Para diseñar continuidad se identifica qué funciones pueden moverse, qué datos necesitan sincronización y qué rutas conservan capacidad bajo falla.

El mapa de infraestructura digital cambia con la pregunta, pero debe conservar tres reglas: declarar las fronteras; documentar dependencias que cruzan esas fronteras; y vincular cada promesa a una prueba y un responsable. El centro de datos queda así en el lugar correcto: es un nodo crítico de una economía digital distribuida, no una isla tecnológica.

Preguntas de aplicación

1. ¿Qué capas —territorio, energía, redes, cómputo, plataformas y operación— sostienen el servicio elegido, y qué dependencia externa podría interrumpirlo?
2. ¿Qué dependencia común podría interrumpir más de una capa del servicio?
3. ¿Qué mapa de capas, responsables y mediciones permite seguir la ruta del dato?

Práctica de dominio

Elija un servicio que conozca y trace un viaje de ida y vuelta del dato: usuario, acceso, transporte, interconexión, centro de datos o nube, procesamiento y respuesta. Marque dos puntos de demarcación comercial y dos dependencias físicas que cruzan esas fronteras. Después proponga una prueba para una falla de energía y otra para pérdida de conectividad.

Decisión de diseño. Antes de aprobar una solución, escriba en una frase qué función digital compra el cliente, qué capas la entregan y dónde termina la responsabilidad de cada proveedor. Si solo puede describir equipos, todavía no ha definido el servicio.

2. El activo digital que se compra, construye y opera

Objetivo del capítulo: describir el objeto de inversión, separar sus fronteras y definir qué capacidad se compra o entrega.

Un centro de datos es una cadena de activos y derechos

El nombre “centro de datos” puede describir productos muy distintos: un terreno con potencial, una conexión eléctrica en estudio, un edificio preparado para equipos, una sala de colocation, un campus de hyperscale, una plataforma de interconexión o una instalación existente que se vende junto con sus contratos. Antes de valorar una oportunidad hay que identificar exactamente qué se transfiere y qué queda fuera.

Capa del activo	Qué puede incluir	Prueba que necesita el inversionista
Terreno y derechos	Propiedad, arriendo, servidumbres, accesos, zonificación	Título, límites, derechos de paso, restricciones y calendario de permisos
Energía y servicios	Capacidad de red, subestación, respaldo, agua, combustible	Estudio, contrato, obras requeridas, costo, fecha y responsable
Edificio y planta	Estructura, energía, refrigeración, protección, controles	Planos, especificaciones, pruebas, condición, capacidad y vida remanente
Telecomunicaciones	Entradas, ductos, MMR, rutas, fibra, carriers y DCI	Levantamientos, acuerdos, planos, mediciones y riesgos compartidos
Contratos y clientes	Reservas, leases, servicios, niveles de servicio y renovaciones	Contrato firmado, obligaciones, fechas, terminación y garantías

Capa del activo	Qué puede incluir	Prueba que necesita el inversionista
Organización operativa	Personal, repuestos, procesos, proveedores y controles	Turnos, cobertura, procedimientos, historial, KPI y plan de mantenimiento

El activo también tiene fronteras de responsabilidad: quién controla el terreno, quién financia la subestación, quién mantiene los generadores, dónde se entrega la energía, quién lleva la fibra hasta el cliente y quién responde por el servicio. Las fronteras físicas, contractuales y operativas pueden ubicarse en puntos diferentes; el modelo de inversión debe dibujarlas.

No confunda los distintos megavatios

Una discusión de inversión suele mezclar capacidad de conexión, potencia firme, demanda máxima, carga de facility, carga IT instalada, capacidad de IT comercializable y capacidad contratada. No son cifras intercambiables. Cada una debe llevar unidad, límite de medición, fecha y condición de disponibilidad.

01 **Capacidad de conexión**

PREGUNTA QUE RESPONDE

¿Qué potencia puede admitir el punto de conexión bajo sus condiciones?

02 **Potencia comprometida**

PREGUNTA QUE RESPONDE

¿Qué suministro está respaldado por un documento vinculante, en qué fecha y con qué obras?

03 **Carga de facility**

PREGUNTA QUE RESPONDE

¿Qué demanda tiene el conjunto del sitio, incluida la infraestructura de soporte?

04	**Capacidad IT** PREGUNTA QUE RESPONDE ¿Qué potencia puede recibir el equipamiento IT en el límite declarado?
05	**Capacidad vendible** PREGUNTA QUE RESPONDE ¿Qué capacidad cumple el diseño, contrato, densidad y plan de expansión aprobados?
06	**Capacidad contratada y energizada** PREGUNTA QUE RESPONDE ¿Qué capacidad tiene cliente y puede ser entregada hoy conforme al contrato?

La potencia contratada no es lo mismo que ingreso. El ingreso depende del modelo comercial, del inicio del servicio, de la capacidad utilizable y de los compromisos del cliente. La electricidad refacturada puede representar un volumen importante, pero debe separarse del margen de servicios para no presentar el flujo bruto como valor añadido.

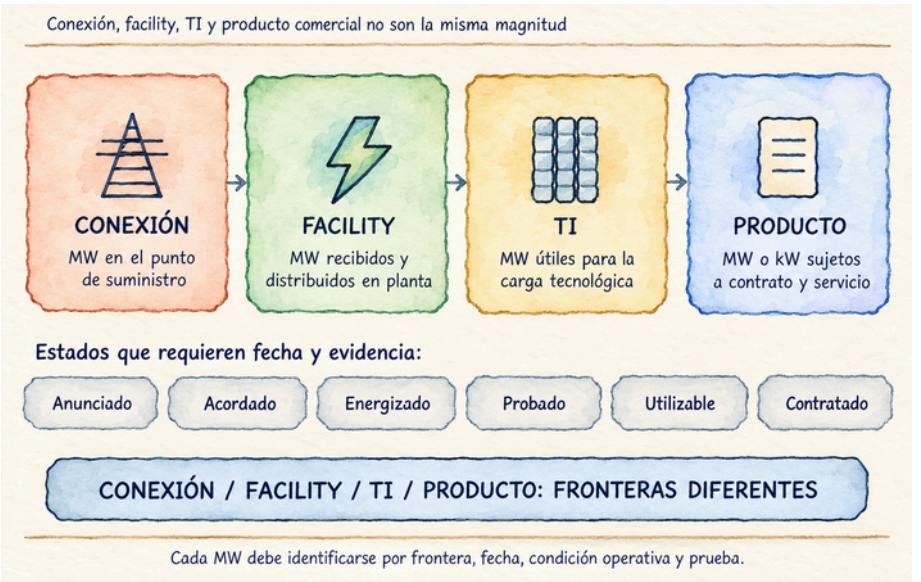


Figura 4. Cuatro fronteras para leer la capacidad en MW

Lectura. El mismo número puede describir potencia conectada, instalada en el facility, disponible para TI o asociada a un producto comercial. La figura separa la frontera física del estado del proyecto: anunciado, comprometido, energizado, probado, utilizable y contratado. Un MW no cambia de categoría por aparecer en una presentación.

La fase también forma parte del activo

El desarrollo atraviesa control del terreno, estudios, permisos, conexión, contratos de clientes, diseño, financiamiento, construcción, commissioning, operación y ampliación. Cada fase consume capital y reduce incertidumbre de manera distinta. El inversionista debe saber qué hito transforma una opción en una obligación y cuál es el costo de cancelar o esperar.

Preguntas de aplicación

1. ¿Qué se está comprando o desarrollando exactamente, dónde están sus fronteras y qué capacidad puede demostrarse hoy con documentos y pruebas?
2. ¿Qué frontera física o contractual altera la capacidad que puede transferirse?
3. ¿Qué título, permiso, contrato y prueba describen el activo que se transfiere?

Ejercicio de campo. Elija una oportunidad real o hipotética. Describa en una página: qué activo se ofrece, quién lo controla, qué derecho se transfiere, qué capacidad existe hoy, qué falta para entregar un servicio y quién asume cada brecha.

Decisión de diseño. No valore un “sitio de 100 MW” sin descomponerlo. Registre terreno, potencia, edificio, IT, red, contratos, operación, fechas y riesgos de cada frontera.

3. Modelos de negocio: quién paga por qué

Objetivo del capítulo: comparar los principales modelos comerciales y mapear cada ingreso con su costo y obligación de servicio.

Modelos comerciales diferentes

Modelo	Cliente y producto	Ingreso habitual	Riesgo que debe analizarse
Instalación empresarial	Una organización aloja sus propios sistemas	Valor interno, ahorro o continuidad del negocio	Subutilización, obsolescencia y costo total propio
Colocation retail	Clientes ocupan racks, cages o potencia por módulos	Capacidad, espacio, energía y servicios	Ocupación gradual, churn, densidad y soporte al cliente
Wholesale	Uno o pocos clientes contratan bloques grandes	Capacidad por contrato y plazo	Concentración de cliente, construcción a medida y renovación
Build-to-suit	El activo se diseña para un cliente bajo contrato	Renta o tarifa pactada por capacidad y servicio	Condiciones de entrega, cambios de alcance, garantías y terminación
Hyperscale	Plataforma de nube o internet despliega infraestructura a escala	Contratos de largo plazo o uso de capacidad propia	Velocidad de expansión, dependencia y requisitos técnicos del cliente
Carrier-neutral / interconexión	Operadores, nubes y empresas se conectan dentro del sitio	Cross-connects, puertos, servicios y presencia	Densidad del ecosistema, neutralidad, acceso y demanda de interconexión
Edge / telecom	Cómputo o alojamiento cerca de usuarios y redes	Capacidad distribuida y servicios técnicos	Costos de operación remota y demanda por ubicación

Modelo	Cliente y producto	Ingreso habitual	Riesgo que debe analizarse
HPC / IA	Capacidad para cómputo de alto rendimiento	Bloques de potencia, racks, servicios y red especializada	Alta densidad, cadena de suministro, refrigeración y rapidez de actualización

Un campus puede combinar varios modelos. El contrato de un cliente mayorista no genera automáticamente la misma economía que una sala de colocation diversificada. El costo de servir, el riesgo de concentración, el nivel de soporte y la inversión específica por cliente son distintos.

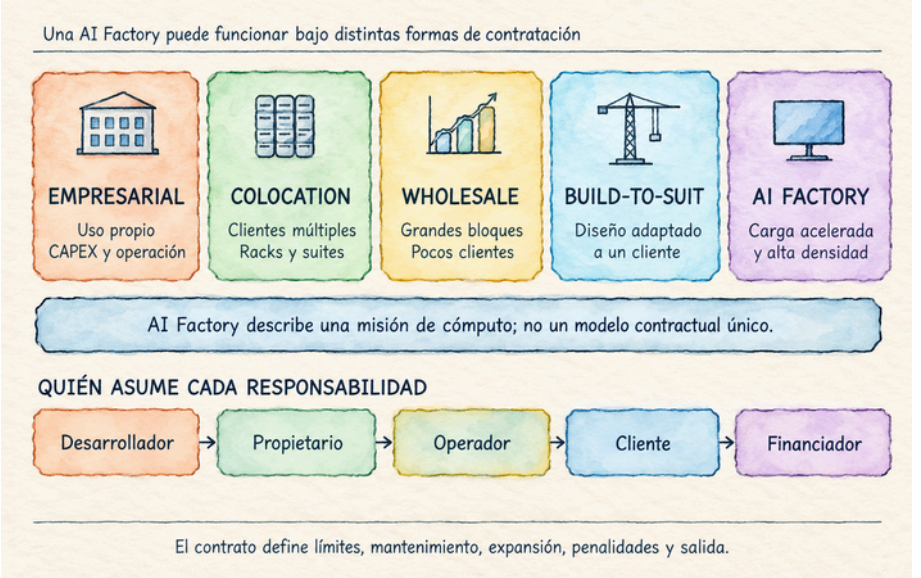


Figura 5. Modelos comerciales y distribución de responsabilidades

Lectura. Enterprise, colocation, wholesale y build-to-suit representan arreglos diferentes de uso, servicio, riesgo y obligación contractual. AI Factory describe una misión de cómputo y puede coexistir con varios modelos comerciales. Para comparar ofertas hay que fijar qué incluye el servicio y quién financia, posee, opera y asume cada riesgo.

Dónde se generan los ingresos

Los contratos pueden incluir reserva de capacidad, potencia o espacio, energía medida, cross-connects, puertos, acceso a carriers, manos remotas, alojamiento de equipos, servicios gestionados, pruebas, operación y soporte. Cada flujo tiene un método de medición, costo, margen, plazo y riesgo de renovación. Algunos productos solo son vendibles cuando existe un ecosistema suficiente de carriers, clientes, clouds y puntos de intercambio.

La conectividad puede ser un costo interno, una obligación de servicio o un producto con ingresos propios. En los tres casos afecta la inversión: exige ductos, rutas, derechos de paso, MMR, personal, inventario, pruebas y acuerdos con terceros.

El contrato convierte el diseño en economía

El equipo de inversión debe revisar: capacidad reservada frente a capacidad entregada; fecha de disponibilidad del servicio; tarifas de energía y mecanismos de ajuste; take-or-pay; penalidades; SLA; obligación de expansión; derechos de auditoría; mantenimiento; terminación; garantías; límites de responsabilidad; permisos de cliente; cambio de densidad; y responsabilidades por transporte de red.

En proyectos llave en mano, un contratista puede asumir más riesgo de diseño y construcción. En proyectos con múltiples paquetes, el dueño conserva más coordinación de interfaces. La asignación contractual debe coincidir con quien controla el diseño, la evidencia, la integración y la capacidad de reparar una falla [27].

Preguntas de aplicación

1. ¿Quién asume cada obligación técnica y económica en el modelo comercial, y qué ocurre con ingresos, costos y continuidad si una de las partes incumple?
2. ¿Qué cláusula distribuye los costos cuando el servicio no alcanza su objetivo?
3. ¿Qué precio, obligación y nivel de servicio respaldan el ingreso proyectado?

Ejercicio de campo. Dibuje tres columnas: cliente, ingreso y obligación. Para cada servicio, anote qué infraestructura habilita el ingreso, quién la mantiene y qué evento puede detener la facturación.

Decisión de diseño. Compare modelos con su contrato y costo de servir. No proyecte ingresos de interconexión, energía o capacidad sin especificar clientes, medición, precio, fecha de inicio y responsabilidades.

4. Demanda, mercado y ruta hacia los ingresos

Objetivo del capítulo: evaluar una demanda local, comprobar su calidad comercial y separar el contexto global del caso específico del sitio.

La demanda mundial no llena un edificio local

El mercado global da contexto, pero la decisión se gana o se pierde en una ubicación, un producto y un calendario concretos. Un clúster puede crecer mientras un nuevo proyecto carece de acceso a energía, rutas, permisos, clientes o condiciones comerciales. El análisis debe conectar clientes alcanzables con capacidad que se pueda entregar en la fecha acordada.

El informe *Energy and AI* de la IEA estimó un consumo cercano a 415 TWh para centros de datos en 2024. Su actualización de abril de 2026 sitúa el consumo de 2025 en torno a 485 TWh y proyecta unos 950 TWh para 2030, aproximadamente el 3 % de la demanda eléctrica mundial; en ese escenario, el consumo de centros de datos centrados en IA se triplica. Son estimaciones globales por escenario, no pronósticos para una ciudad ni contratos de suministro. Explican por qué la potencia y la fecha de conexión inciden en el mercado, pero no prueban demanda, precio o viabilidad para un predio [23, 30]. *Electricity 2026* complementa esta lectura con escenarios de generación, redes y flexibilidad del sistema eléctrico [24].

La encuesta global de Uptime Institute 2026 describe una industria que continúa invirtiendo bajo mayor complejidad y escrutinio, con presión en costos, potencia, previsión de capacidad, suministros y talento [25]. Para el lector, la consecuencia práctica es clara: validar calendario, personal y cadena de suministro junto con la proyección comercial.

Qué buscan los clientes: conectividad y continuidad según su misión

Los clientes no compran una etiqueta de Tier ni una cantidad de carriers en una presentación. Compran una capacidad para ejecutar una aplicación, conectar usuarios y destinos, cumplir compromisos y recuperarse ante eventos definidos. La prioridad depende de la carga, el contrato, el lugar y el costo de la interrupción.

Cliente o carga	Prioridad de servicio	Qué espera de conectividad	Qué debe aclararse sobre redundancia
Empresa y nube privada	Acceso estable a sedes, usuarios, nubes y aplicaciones corporativas	Conexiones WAN y cloud con capacidad, controles, latencia y soporte definidos	Si las rutas llegan por ductos y entradas distintas; qué servicios siguen ante pérdida de un carrier
Finanzas, gobierno y sectores regulados	Seguridad, trazabilidad, continuidad y cumplimiento de jurisdicción	Rutas controladas, demarcaciones claras, cifrado cuando aplique y registros verificables	Si la continuidad satisface RTO/RPO y obligaciones del cliente; separar failover probado de redundancia dibujada
Nube e hyperscale	Capacidad escalable, plazos precisos y conectividad a regiones y redes troncales	Backhaul de alta capacidad, DCI, on-ramps y rutas activables por fase	Independencia física de rutas, capacidad sobreviviente, calendario de expansión y causas comunes
Colocation y clientes wholesale	Entrega puntual de espacio, potencia y servicios contratados	MMR funcional, carriers suficientes, cross-connects, acceso y trazabilidad del circuito	Qué soporta la infraestructura del centro y qué depende del cliente, del carrier o del proveedor externo

Cliente o carga	Prioridad de servicio	Qué espera de conectividad	Qué debe aclararse sobre redundancia
Carrier, ISP y proveedor de contenido	Presencia eficiente, interconexión y acceso a usuarios, pares y servicios	Neutralidad, MMR, puertos, IX, peering, fibra oscura o longitudes de onda según oferta	Diversidad por tramo y acceso, operador de cada segmento y efecto de una falla de MMR o corredor
IA y HPC	Rendimiento de clúster, sincronización y movimiento de datos	Fabric interno de gran capacidad; DCI y salida externa según entrenamiento, inferencia y ubicación	Probar por separado redundancia de la red este-oeste, la red externa y los enlaces entre sitios
Baja latencia y tiempo real	Retardo, jitter y pérdida dentro del umbral de la aplicación	Ubicación adecuada, rutas medidas hasta destinos concretos y rendimiento estable bajo carga	Conmutación que preserve el umbral; medir antes y después del failover y declarar límites
Recuperación ante desastres	Restauración de datos y servicios en un sitio alternativo	Replicación acorde a distancia, ancho de banda, RPO y ventana de recuperación	Separación geográfica y de riesgo común; prueba de recuperación con cronómetro y verificación de datos
Edge e industria	Proximidad, disponibilidad local y soporte remoto	Acceso desde planta, sensores, usuarios y núcleo; administración fuera de banda cuando se requiera	Qué funciona de forma local durante pérdida del backhaul y cuánto tarda la restauración del acceso remoto



Figura 6. De la misión del cliente al requisito del campus

Lectura. Los perfiles de carga condicionan lo que el cliente valida: una AI Factory puede exigir densidad y rendimiento de clúster; un proveedor cloud, capacidad escalable y conectividad; una entidad regulada, ubicación y continuidad; un operador, interconexión y demarcación. Son arquetipos para iniciar la conversación, no especificaciones universales ni sustitutos de un RFI.

Qué valida un gran cliente durante la compra

Un cliente de gran escala no evalúa solo el edificio ni el precio por rack. Evalúa si el proveedor puede entregar su carga en el lugar, fecha, densidad y nivel de servicio que necesita, con evidencia contractual y operativa. En la decisión suelen participar arquitectura de infraestructura, redes, seguridad, compras, finanzas, continuidad, sostenibilidad y el dueño de la aplicación. La propuesta debe responder a todos con una descripción coherente del servicio.

Dimensión de compra	Pregunta del cliente	Evidencia que espera
Potencia y calendario	¿Cuántos MW de carga IT puedo energizar, en qué fecha y por fases?	Frontera de medición, acuerdo de suministro, obras, hitos y pruebas

Dimensión de compra	Pregunta del cliente	Evidencia que espera
Refrigeración y densidad	¿Qué kW por rack soporta cada sala, con qué envolvente térmica y tecnología?	Capacidad por zona, temperaturas, caudal, modo degradado, agua y aceptación bajo carga
Conectividad	¿Puedo alcanzar mis redes, nubes, carriers, usuarios y otros sitios por las rutas necesarias?	MMR, on-ramps, cross-connects, rutas físicas, capacidad y demarcaciones
Resiliencia	¿Qué ocurre si pierdo energía, refrigeración, una ruta, una sala o un proveedor?	Árbol de fallas, capacidad sobreviviente, procedimientos y pruebas de failover
Rendimiento	¿Qué latencia, jitter, pérdida y throughput recibirá mi aplicación hasta sus destinos?	Mediciones desde extremos definidos, percentiles, carga y límites del SLA
Seguridad y cumplimiento	¿Qué controles, auditorías, ubicación de datos y responsabilidades aplican?	Certificaciones vigentes, controles, registros, jurisdicción y matriz de responsabilidades
Economía total	¿Qué pagaré por potencia, energía, espacio, red, expansión y soporte?	Tarifario, reajustes, cargos de interconexión, condiciones de capacidad y escenarios de costo
Sostenibilidad y recursos	¿Cómo se acreditan energía, emisiones, agua y eficiencia?	Límites y períodos de medición, método de atributos energéticos, consumo de agua y reporte
Operación	¿Quién responde, mantiene, comunica y restaura el servicio?	Equipo, escalamiento, procedimientos, repuestos, pruebas y gestión de cambios

Para hyperscale, cloud y cargas de IA suelen pesar la escala, el tiempo de entrega, la expansión por bloques, la potencia firme y la red de alta capacidad. Para finanzas y servicios regulados pesan

además la trazabilidad, la auditoría, la separación de riesgos y la recuperación demostrable. El peso relativo cambia por cliente y contrato; la RFI o RFP debe convertirlo en condiciones medibles.

Estos perfiles orientan la conversación y no son requisitos universales. El contrato y el análisis de la aplicación fijan la especificación. Un centro de datos puede ofrecer dos carriers sin tener dos rutas físicas independientes; dos entradas al edificio tampoco prueban diversidad si convergen en el mismo ducto, puente, cámara, subestación o punto de presencia.

Del requerimiento a una prueba de conectividad

Antes de cotizar o diseñar, documente los extremos del servicio, la capacidad inicial y futura, los percentiles de latencia, jitter y pérdida, la ventana de disponibilidad, el SLA, el RTO/RPO y el tiempo de recuperación requerido. Luego trace cada camino desde el equipo del cliente, rack y ODF hasta MMR, salida del edificio, ruta exterior, carrier, destino y retorno. Marque quién posee y opera cada tramo, qué comparte con otros servicios y quién responde durante una falla.

La redundancia se demuestra con mapas de ruta revisados, derechos de paso, inspección de entradas y puntos de convergencia, inventario de dependencias, medición desde extremos representativos y una prueba segura de failover. El informe debe indicar qué falló, cuánto tráfico sobrevivió, qué rendimiento se mantuvo, cuánto demoró la recuperación y qué evidencia quedó registrada. Esos resultados convierten “dos conexiones” en una afirmación que compras, ingeniería y operaciones pueden revisar.

De una señal de mercado a un contrato

Señal	Qué acredita	Qué todavía no acredita
Tendencia global o anuncio público	Interés sectorial y posible dirección del mercado	Clientes, precio, competencia, permisos ni energía local

Señal	Qué acredita	Qué todavía no acredita
Conversación comercial	Problema o necesidad potencial	Presupuesto, calendario o compromiso de compra
RFI / RFP	Requisitos de compra y proceso competitivo	Adjudicación ni obligación firme
Carta de intención	Interés documentado con condiciones	Contrato, garantía, inicio de facturación o demanda financiable
Reserva o contrato condicional	Compromiso sujeto a hitos identificables	Capacidad entregable si las condiciones no están resueltas
Contrato ejecutable	Obligaciones, capacidad, precio, hitos y remedios	Que el sitio pueda cumplirlo física y temporalmente
Servicio energizado y aceptado	Entrega según el criterio y fecha acordados	Rentabilidad de toda la cartera o éxito de fases futuras

La demanda debe evaluarse por segmento: cloud, hyperscale, IA/HPC, empresas, servicios financieros, telecomunicaciones, plataformas públicas, contenido, continuidad y edge. Para cada segmento se pregunta qué latencia, regulación, densidad, conectividad, plazo, certificación y modelo de precio necesita.

El estudio local que necesita un inversionista

Un informe de mercado útil debe incluir área de influencia y rutas de latencia; clientes y tomadores de decisión; capacidad existente y anunciada; proyectos en ejecución frente a ideas; precios comparables con fecha y producto; capacidad prevista de energía y fibra; nube, carriers, IX y DCI accesibles; competencia por suelo, agua, profesionales y equipos; permisos y restricciones; tasa de absorción probable; y alternativas de expansión.

Cada inventario necesita reglas de conteo: ¿se registra una instalación anunciada, un sitio en permisos, una obra financiada o

un activo operativo? ¿Se contabiliza potencia del campus o carga IT? ¿El proyecto tiene cliente, calendario de conexión y financiación? Un registro sin estatus puede exagerar oferta o demanda.

Campus Horizonte | La demanda no está contratada

Expediente hipotético H-01. El promotor desea cinco bloques de 100 MW IT y reporta conversaciones comerciales por 300 MW, una carta de intención no vinculante por 120 MW y ninguna orden de compra ejecutable. Para la puerta de demanda, la capacidad actualmente respaldada por un contrato definitivo es 0 MW; los 300 MW son una hipótesis comercial, no ocupación asegurada.

La proyección económica posterior utiliza una curva de utilización potencial. No debe leerse como evidencia de contratos firmados. Antes de reservar equipos de largo plazo, el comité exige producto, tarifa, perfil de carga, crédito del comprador, hitos de aceptación, salida contractual y plazo vinculante por bloque.

Preguntas de aplicación

1. ¿Qué cliente concreto respalda la demanda, qué obligación ha firmado y qué evidencia demuestra que su carga corresponde al sitio y al producto ofrecido?
2. ¿Qué condición de mercado dejaría capacidad sin comprador si cambia el escenario?
3. ¿Qué contrato, carga y cronograma prueban la demanda atribuida al sitio?

Práctica de escenarios. Para cada fase, modele tres curvas de ocupación y energización. En el escenario adverso, cambie fechas de potencia, cierre de cliente y construcción. En el favorable, solo acelere capacidad que tenga evidencia. Registre qué acción cambia en cada caso: reducir fase, mantener la opción, buscar cliente ancla, retrasar compra de equipos o abandonar.

Decisión de diseño. Escriba la tesis comercial en cinco líneas: cliente objetivo, producto, ubicación, fecha de disponibilidad y evidencia de compra. Separe hechos, inferencias y supuestos. Si no puede señalar un comprador y un servicio, todavía tiene una hipótesis de mercado.

5. Rutas internacionales, cables submarinos y lectura de Chile

Objetivo del capítulo: evaluar corredores terrestres, submarinos y geografía digital regional.

El centro de datos participa en una geografía digital

Los centros de datos alcanzan usuarios, nubes y plataformas internacionales a través de una combinación de fibra terrestre, puntos de intercambio, backbones y sistemas submarinos. La conectividad internacional está formada por tramos, estaciones de amarre, derechos de paso terrestres, redes metropolitanas, acuerdos comerciales y puntos de salida. La ITU señala que los cables submarinos transportan más del 99 % del tráfico mundial de datos; esta cifra expresa su importancia sistémica, pero no implica que cada país o aplicación dependa de la misma ruta [7]. El servicio depende también de los enlaces terrestres a ambos lados y de la posibilidad de reparar o desviar tráfico.

De la sala del centro de datos al destino internacional

Un cable submarino no es una conexión directa entre un rack y otro continente. La ruta atraviesa varios dominios con propietarios y contratos distintos:

Tramo	Activos y decisiones	Riesgo que se verifica
Centro de datos	Rack, ODF, MMR, cross-connect y equipo del cliente o carrier	Puerto, bandeja, energía, sala, demarcación y capacidad contratada

Tramo	Activos y decisiones	Riesgo que se verifica
Salida metropolitana	Ductos, cámaras, puentes, accesos y red metro hasta un punto de presencia o landing station	Cruces compartidos, terceros, permisos, plazos y rutas independientes
Estación de amarre	Entrada terrestre, transmisión, potencia, operación y protección del sitio	Acceso a más de una estación, dependencia eléctrica y salida terrestre común
Sistema submarino	Segmentos, pares de fibra, repetidores, derivaciones, alimentación y protección	Geografía marina, cortes, reparación, mantenimiento y restauración comercial
Costa y red remota	Estación de llegada, metro, backbone, IX, cloud on-ramp o destino	Si el tráfico llega al mercado o nube prometidos después de aterrizar

El sistema puede tener una capacidad de diseño muy superior a la capacidad iluminada, vendible o contratada. Una longitud publicada tampoco revela la ruta exacta: el trazado detallado, los repetidores y ciertos derechos pueden ser confidenciales. En una diligencia se separan capacidad de diseño, equipada, utilizable, contratada y de restauración; cada cifra lleva la evidencia que la respalda.

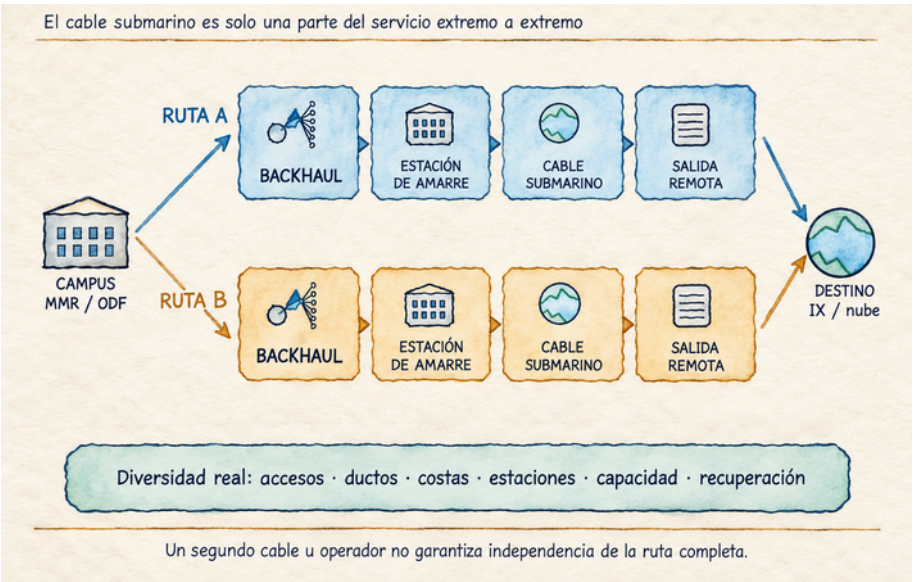


Figura 7. Ruta internacional desde el campus hasta el destino

Lectura. El cable submarino es un tramo de una ruta mayor: campus, MMR, transporte terrestre, estación de amarre, sistema submarino y backhaul del otro extremo. La alternativa se verifica por acceso, costa, estación, sistema, capacidad y ruta terrestre; un segundo nombre de cable no demuestra independencia.

Qué valor aporta un cable submarino al cliente

Los sistemas submarinos conectan mercados y centros de datos con redes cloud, plataformas de contenido, servicios financieros, sitios de recuperación y flujos globales de datos. Las cachés y redes de distribución de contenido mantienen parte del consumo cerca del usuario, pero no sustituyen las rutas internacionales que operadores usan para sincronización, acceso a nubes, interconexión entre regiones, respaldo y grandes movimientos de datos. El informe de resiliencia de la ITU de 2026 señala exposición física, reparación prolongada y concentración geográfica entre los problemas a gestionar [33]. La capacidad disponible puede ser margen para crecimiento, restauración y resiliencia; no implica por sí sola que la infraestructura esté ociosa.

El cliente compra una ruta y un servicio con latencia, capacidad, disponibilidad, precio, demarcación y recuperación definidos; no compra únicamente el nombre del cable. La latencia total incluye la ruta submarina, redes terrestres, encaminamiento IP, puntos de interconexión y destino. La distancia del mapa no basta para prometer latencia, y una ruta corta no garantiza que el tráfico real la utilice.

Modelos de propiedad y compra

Los cables se financian y comercializan con modelos que pueden incluir consorcios de operadores, sistemas privados, inversión de grandes proveedores de nube, sociedades de infraestructura, capacidad en pares de fibra, espectro, longitud de onda y servicios gestionados. La forma de propiedad afecta quién decide el trazado, quién ilumina y mantiene los equipos terminales, qué capacidad se reserva, cómo se vende la restauración y quién participa en una reparación.

Producto o derecho	Control que puede obtener el comprador	Pregunta crítica
Capacidad IP o Ethernet	Servicio gestionado entre extremos definidos	¿Dónde termina, qué SLA aplica y qué se restaura?
Longitud de onda	Canal óptico con capacidad y demarcación acordadas	¿Qué nodos, protección, latencia y equipos incluye?
Espectro	Parte de la capacidad óptica del sistema bajo condiciones de uso	¿Quién suministra terminales, amplificación y soporte?
Par de fibra	Capacidad física de un par dentro del sistema, con derechos y obligaciones asociados	¿Quién ilumina, mantiene, da energía, repara y habilita landing stations?

Producto o derecho	Control que puede obtener el comprador	Pregunta crítica
IRU o derecho de uso	Derecho contractual a capacidad por plazo y condiciones específicas	¿Qué mantenimiento, impuestos, renovación, incumplimiento y traslado cubre?

El título del producto no es suficiente. El contrato debe especificar punto de entrega, ruta, capacidad inicial y futura, pruebas, tratamiento de interrupciones, restauración, mantenimiento, derechos de expansión, propiedad de equipos, condiciones de servicio y salida contractual.

La revisión de resiliencia extiende el análisis a la geografía: compara la zona costera, la estación de amarre, el backhaul y las opciones de reparación. El informe de la ITU y el International Cable Protection Committee resume riesgos de concentración, exposición física y reparación que deben contrastarse con la información del operador [33].

Continuidad de mar a tierra

La planificación de una ruta internacional debe trazar el servicio desde el campus hasta el destino. Se identifican la sala de entrada, los enlaces metro, los backbones, los puntos de presencia, las estaciones de amarre y los sistemas submarinos. Un plan de continuidad que empieza en el landing station y omite los primeros kilómetros terrestres deja sin examinar una dependencia crítica.

También se diferencian capacidad instalada, capacidad utilizable y capacidad que sobrevive. La capacidad teórica de un sistema no implica que el contrato del cliente tenga derechos sobre ella o que exista en el destino. La protección comercial puede reservar capacidad de restauración, pero debe estar escrita y probarse en un ejercicio cuando sea posible.

El mapa de extremo a extremo distingue al menos tres capas: el tramo de acceso del centro hasta el backbone; el backhaul terrestre que llega a la estación de amarre; y el sistema submarino con su estación y red del país remoto. Cuando corresponde, se incorpora la interconexión local y el tramo final hacia una nube o cliente. Para cada capa se anota dueño, operador, derechos, contrato, capacidad, latencia, rutas alternativas, punto de reparación y responsable de incidente.

La diversidad se evalúa por evento, no por dibujo. Rutas submarinas diferentes pueden acercarse o converger en la costa; dos estaciones de amarre pueden depender de una única red eléctrica o una carretera; dos carriers pueden usar la misma infraestructura mayorista; y una ruta alternativa puede tener capacidad insuficiente para restaurar el tráfico. Se solicita al proveedor suficiente evidencia para probar la separación sin publicar a quien no corresponde la información sensible de seguridad.

Corredores internacionales: comparación por misión

Variable	Corredor para contenido y nube	Corredor para empresa y recuperación	Evidencia
Latencia	Objetivos por región y población atendida	RTT máximo entre primario, secundario y usuario	Medición de extremo a extremo y ruta
Capacidad	Crecimiento de tráfico, caché, cloud y DCI	Réplica, backup, voz y aplicaciones críticas	Capacidad utilizable y capacidad post-falla
Diversidad	Sistemas, estaciones y salidas terrestres	Separación geográfica y de operadores	SRLG, route map, inspección y acuerdos
Reparación	Opciones de restauración y capacidad temporal	RTO, RPO y ventana de tolerancia	MTTR contractual, disponibilidad de buque y repuestos

Variable	Corredor para contenido y nube	Corredor para empresa y recuperación	Evidencia
Comercial	Derechos, escala, plazos y opción de ampliar	Precio de continuidad y capacidad reservada	Contrato, garantías, cargos de restauración
Gobernanza	Jurisdicción, permisos y seguridad	Cumplimiento, soberanía y auditoría	Licencias, responsabilidades y registros

El cable no elimina las restricciones de conectividad del interior. La capacidad de un sistema solo crea valor para un centro cuando se enlaza a rutas terrestres, carriers, MMR, DCI y demanda comercial que pueden activar ese acceso.

Chile como caso metodológico

Chile permite ilustrar cómo la geografía, la concentración de demanda, la disponibilidad de energía, la costa y las rutas internacionales condicionan las decisiones de infraestructura. Una lectura seria del mercado evita mezclar unidades y etapas. Sitio físico, instalación comercial, empresa operadora, sociedad propietaria, permiso ambiental, conexión eléctrica y anuncio de inversión pueden referirse a realidades distintas. Un registro administrativo no demuestra que un edificio esté operando; una cifra de potencia no siempre es potencia IT; un proyecto anunciado no equivale a capacidad disponible.

La metodología del inventario público que acompaña el proyecto editorial separa instalación física, marca u operador comercial, sociedad vehículo y alias regulatorio. También distingue un universo amplio de sitios, el mercado estricto de instalaciones comerciales u operativas y las fases de proyecto con evidencias públicas. Este modelo evita duplicar campus, confundir sociedades y sumar megavatios que describen cosas diferentes. Los totales y

estatus deben publicarse solo con fecha de corte y fuentes trazables.

Para la conectividad, la lectura territorial pregunta: ¿qué corredores terrestres están disponibles?, ¿qué operadores poseen o arriendan activos?, ¿dónde se concentra el acceso a internet?, ¿qué rutas alcanzan los centros de intercambio?, ¿qué ciudades pueden sostener nodos regionales?, ¿cómo se conectan los sitios con los sistemas submarinos? Estas preguntas permiten evaluar oportunidades sin convertir una hipótesis en un anuncio de inversión.

El reporte de Colliers con cifras al primer semestre de 2026 registra 36 centros de datos operativos y 255 MW instalados en Chile; identifica 34 desarrollos futuros y más de 120 MW en construcción. También informa ocho desarrollos que sumarían 367,8 MW y US$1.616 millones hacia 2031 [70]. La división simple da cerca de US$4,39 millones/MW, pero no constituye un costo de construcción comparable: el reporte no presenta en esa síntesis una frontera de CAPEX y MW homogénea con los benchmarks de infraestructura.

Los benchmarks publicados para Chile y Santiago tampoco son una tarifa única. Gleeds publicó un rango de US$8,6–10,9 millones/MW para Santiago en enero de 2025; una presentación ante el Senado en abril de 2026 cita US$10–12 millones/MW como CAPEX de infraestructura, con fuente GPS Property [68, 69]. PwC estima que el equipamiento TIC representará alrededor del 95 % de la inversión total en centros de datos de Chile en 2026 [71]. Por eso, el costo de construcción no representa el costo total de cómputo, servidores y GPU.

Para comparar una oferta hay que confirmar año base, moneda, inflación, alcance, redundancia, densidad, refrigeración, costos del propietario, conexión externa y si el denominador es MW IT, facility o conexión. En los ejercicios del libro, US$11 millones/MW IT es un supuesto didáctico de base, acompañado de sensibilidad;

las cifras públicas se usan como referencia para pedir alcance y denominador antes de convertirlas en presupuesto.

Humboldt y Alisios: proyectos que deben leerse por etapa

El Gobierno de Chile informó el 22 de junio de 2026 que se había aprobado la instalación del sistema Humboldt y estimó su instalación para el último trimestre de 2026 y la operación en 2028. Esa comunicación describió más de 21.000 kilómetros de infraestructura en dos rutas, una entre Santo Domingo y Sídney y otra entre Santo Domingo y Ciudad de Panamá; los plazos y características publicados son estimaciones del proyecto y requieren nueva verificación antes de una decisión comercial [34]. El estado editorial de este manuscrito es **en desarrollo según la información oficial consultada**, no en servicio.

Google anunció Alisios el 11 de agosto de 2026 como parte de su iniciativa Americas Connect; el anuncio describe una conexión entre República Dominicana, Panamá y Chile [35]. La noticia representa una señal de posible evolución del mapa regional, no una ruta disponible para un contrato actual. Al evaluar cualquier sistema anunciado, compruebe las autorizaciones, el trazado final, las estaciones, los participantes, el calendario, la inversión, los derechos de capacidad y la fecha real de Ready for Service.

Proyecto	Estado que debe usarse en una decisión	Qué confirmar antes de incorporarlo al diseño
Humboldt	Aprobación y calendario estimado comunicados oficialmente en junio de 2026; no asumir operación antes de RFS	Fecha de construcción y RFS vigente, landing station, backhaul, comercialización, capacidad y acuerdos de restauración
Alisios	Anuncio corporativo de agosto de 2026; no tratar como capacidad contratada	Permisos, ruta, estaciones, socios, fecha, producto disponible y conexión terrestre

La diferencia entre **anunciado**, **financiado**, **autorizado**, **en construcción**, **Ready for Service** y **operativo comercialmente** puede representar años y alterar la exposición de capital. Un estudio de sitio puede considerar una ruta futura como oportunidad de expansión, pero la capacidad inicial debe apoyarse en servicios existentes o compromisos que sobrevivan a la demora del nuevo sistema.

Una cartera de sitios y corredores

Clasifique sitios por función, no solo por municipio. Un campus hyperscale concentra potencia y tráfico; un nodo regional acerca servicios a empresas y contenido; un edge industrial reduce el recorrido de una decisión local; un punto de amarre facilita el intercambio internacional. Cada función requiere redes distintas.

La comparación internacional debe mantener una misma plantilla y permitir que cada mercado pese distinto. No existe una lista mundial de ciudades ganadoras que reemplace la diligencia local. Se comparan mercado atendible, latencia a usuarios y nubes, potencia y tiempo de conexión, agua y clima, suelo y permisos, conectividad física, costes, riesgos de desastre, fiscalidad, regulación de datos y capacidad operativa.

Mercado o caso	Lectura que enseña	Evidencia que debe pedir el inversionista
Estados Unidos	El crecimiento nacional de la carga se expresa en escenarios, no en potencia conectable para cada predio [61]	Estudio de conexión local, obras, fecha, capacidad firme y exposición a congestión
Unión Europea	La medición y el reporte de desempeño energético forman parte del marco regulatorio regional [62]	Obligaciones por jurisdicción, datos comparables, KPI, auditoría y calendario de reporte

Mercado o caso	Lectura que enseña	Evidencia que debe pedir el inversionista
Singapur	La expansión se articula con un objetivo de capacidad y una hoja de ruta de sostenibilidad; una meta no equivale a MW ya entregados [63]	Asignación efectiva, potencia, agua, condiciones tropicales, permisos y criterios de eficiencia
Japón	El enfoque watt-bit coordina planificación eléctrica y de telecomunicaciones para habilitar nuevos centros [64]	Ubicación conjunta de campus, subestaciones, rutas, interconexión y fechas
Sudáfrica	La conectividad submarina puede sostener un polo regional, mientras la energía debe validarse sitio por sitio [66, 67]	Potencia y respaldo locales, agua, rutas a estaciones de amarre, capacidad y tiempos de reparación
Brasil	La EPE incorpora la carga de data centers a la recopilación y planificación del sistema eléctrico [65]	Registro del proyecto, demanda horaria, punto de conexión, transmisión y generación disponible
Chile	Los anuncios de cables del Pacífico abren corredores potenciales, pero la llegada al cliente depende del tramo terrestre y de la etapa real del proyecto [34, 35]	Estación de amarre, backhaul, permisos, capacidad, fecha de servicio y ruta de recuperación

Estas filas son lentes para formular preguntas, no generalizaciones sobre todos los países de una región. Dentro de un mismo mercado pueden coexistir un distrito urbano conectado, un corredor sin potencia y una zona con energía competitiva pero sin clientes o

backhaul. El estudio debe descender al predio, subestación, ducto y contrato.

Evalúe cada corredor por capacidad, diversidad de rutas, conexión troncal, permisos, derechos de vía, exposición a desastres, reparación y demanda ancla. En zonas sísmicas, costeras o inundables, compruebe alternativas geográficas con evidencia de campo y de operador.

Perspectiva global

La concentración de centros de datos y operadores puede aumentar la interconexión, pero también competir por suelo, potencia y fibra. En mercados en expansión, un campus puede adelantarse a la disponibilidad de carriers, cloud on-ramps e IX; esa brecha afecta el calendario comercial. Sitio, planta exterior, capacidad y rutas internacionales deben avanzar coordinados.

La IA amplía el tráfico entre dispositivos, regiones y nubes. La arquitectura seguirá combinando conectividad metropolitana, nacional e internacional, con políticas que ubiquen datos según latencia, costo, soberanía y capacidad.

Lecturas regionales para comparar proyectos

Estados Unidos

El informe del Departamento de Energía publicado en 2024 estimó 176 TWh de consumo de centros de datos en 2023 y presentó escenarios de 325–580 TWh para 2028. Esa horquilla describe un análisis nacional de ese año; no demuestra que una utility, subestación o sitio pueda entregar potencia en una fecha concreta. La diligencia debe bajar del escenario país al territorio eléctrico y al acuerdo de conexión [61].

Unión Europea

La Comisión Europea estableció mecanismos de seguimiento y reporte de desempeño energético de centros de datos, con

indicadores comunes para construir una base de evidencia. El inversionista debe verificar qué obligaciones aplican a la instalación, quién reporta y cómo se comparan límites, período y medidores. El modelo europeo ilustra que transparencia y cumplimiento pueden formar parte de la operación del activo [62].

Singapur

La hoja de ruta de IMDA de 2024 planteó al menos 300 MW de capacidad adicional en el corto plazo y vinculó el crecimiento con despliegues de energía verde. La cifra es un objetivo anunciado por la autoridad, no capacidad automáticamente construida. El estándar tropical añade una lección de diseño: temperatura exterior, rechazo de calor, eficiencia y confiabilidad deben analizarse en las condiciones locales [63].

Japón

El marco público de colaboración watt-bit reconoce que la expansión de centros de datos necesita coordinar telecomunicaciones y electricidad. Para el desarrollador, la consecuencia es estudiar conjuntamente localización de campus, subestaciones, corredores de fibra y cronogramas de red; un terreno con una sola de esas capas disponible no completa el caso [64].

Sudáfrica

Las comunicaciones oficiales presentan conectividad submarina y centros de datos como parte de la posición digital regional. Esa oportunidad debe contrastarse con el suministro eléctrico, la disponibilidad de agua, el backhaul terrestre y los planes de contingencia de cada ciudad y predio. La narrativa del hub regional sirve para formular preguntas; la decisión necesita contratos, capacidad y pruebas locales [66, 67].

Brasil

La Empresa de Pesquisa Energética mantiene instrumentos para recopilar y proyectar la carga de centros de datos dentro de la planificación eléctrica. Para un campus, esto convierte la calidad del dato de demanda —ubicación, etapa, perfil horario y fecha— en una interfaz entre promotor, transmisión y planificación de generación. Una previsión nacional sigue siendo contexto, no prueba de conexión de un proyecto particular [65].

Chile y los corredores del Pacífico

Humboldt y los sistemas anunciados por operadores deben leerse por separado según estado, ruta, estación de amarre y calendario. El valor para un campus depende del backhaul desde la costa, de la interconexión metropolitana, de la capacidad disponible y de una ruta alternativa que no comparta los mismos dominios de falla [34, 35].

Estas lecturas comparan decisiones y dependencias observables; no constituyen una clasificación de mercados ni una encuesta exhaustiva de todos los países. Antes de invertir se actualizan las fuentes, la legislación, las condiciones de red y el estado de cada proyecto en la jurisdicción concreta.

Preguntas de aplicación

1. ¿Qué ruta internacional conserva conectividad ante la falla del corredor principal, y qué tramos terrestres, estaciones de amarre y contratos hacen viable esa alternativa?
2. ¿Qué tramo terrestre limita la recuperación si el sistema submarino queda fuera de servicio?
3. ¿Qué mapas, acuerdos de capacidad y estado de servicio confirman la ruta internacional?

Práctica de dominio

Compare dos corredores internacionales por puntos de amarre, rutas terrestres, diversidad, latencia, reparación, permisos y opciones de contingencia.

Decisión de diseño. Evalúe cada centro de datos como parte de una geografía de servicio. Dibuje las rutas físicas terrestres y submarinas, identifique las dependencias comunes y registre qué capacidad es operativa, contratada, en construcción o solo proyectada.

6. Siete puertas para decidir si un proyecto es viable

Objetivo del capítulo: preparar una evaluación documentada de sitio y declarar qué brechas bloquean la siguiente inversión.

Cada puerta exige una prueba

Puerta	Evidencia para verificar	Señal de alerta	Decisión que habilita
1. Demanda y contratos	Cliente, producto, capacidad, contrato, precio, calendario y solvencia	Mercado agregado o carta de interés sin obligación	Definir cliente, producto y fase
2. Terreno, derechos y permisos	Título, servidumbres, accesos, geotecnia, uso de suelo y ruta de aprobación	Control temporal, acceso incierto o autorización supuesta	Asegurar el sitio y autorizar estudios
3. Energía	Potencia, punto, fecha, obras, costo, suministro y respaldo	Carta preliminar sin fecha, alcance o responsable	Fijar capacidad y cronograma eléctrico
4. Conectividad	Rutas físicas, operadores, capacidad, MMR, latencia y contingencia	Dos servicios comparten corredor crítico	Confirmar conectividad para el cliente objetivo
5. Diseño y modelo operativo	Carga, refrigeración, agua, clima, protección, personas y resiliencia	Diseño no corresponde a densidad, recursos o turnos	Aprobar requisitos y modelo de operación
6. Construcción y commissioning	CAPEX, cronograma, equipos, contratos, interfaces, pruebas y aceptación	Presupuesto parcial o fechas incompatibles	Autorizar construcción y puesta en servicio

Puerta	Evidencia para verificar	Señal de alerta	Decisión que habilita
7. Retorno, financiación y salida	Contratos, OPEX, flujo de caja, deuda, sensibilidad y valor residual	Rentabilidad depende de supuestos no contratados	Aprobar, condicionar, diferir o detener capital

En cada puerta registre: evidencia recibida, emisor, fecha, versión, condiciones, responsable de revisión, confianza, brecha, costo de cierre y decisión. “Demostrada” significa que la prueba es suficiente para la fase; “condicionada” indica que existe una obligación, hito o mitigación concreta; “en investigación” significa que falta información; “no demostrada” significa que no se debe presentar como hecho.

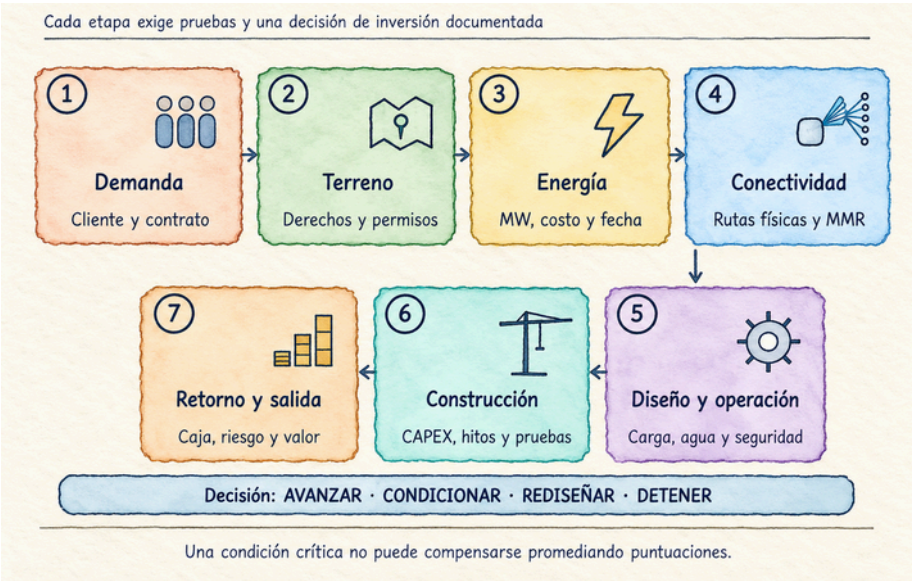


Figura 8. Las Siete Puertas y la evidencia que habilita capital

Lectura. Cada puerta convierte una afirmación en una prueba fechada, con responsable, costo de cierre y consecuencia de incumplimiento. El comité puede condicionar, reducir la fase o detenerse si falla una dependencia crítica. El promedio de una puntuación no compensa la ausencia de energía, derechos del sitio, ruta o demanda.

Las condiciones críticas no se promedian

Una puntuación agregada puede ayudar a comparar sitios después de excluir condiciones de descarte. No debe ocultar que la red no entregará potencia a tiempo, que un derecho de paso no existe o que un cliente puede cancelar sin consecuencias. Una única puerta crítica abierta puede justificar detener el proyecto, limitar el gasto a estudios o estructurar una opción que preserve la posibilidad de salir.

La diligencia de sostenibilidad debe entrar temprano en la decisión. Energía, agua, calidad ambiental, ruido, tráfico y relación con la comunidad pueden afectar permisos, plazos, costos, reputación y valor del activo. La guía conjunta de EDF y Nuveen organiza preguntas para inversionistas sobre impactos de energía, agua y comunidades a través de la cadena de valor [26].

La evidencia de la sala de datos

El data room debe separar hecho, compromiso, supuesto e inferencia. Un estudio preliminar no es un acuerdo; una carta de capacidad no equivale a energía disponible; una ruta dibujada no es derecho de paso; una prueba de fábrica no es commissioning integrado; un cliente interesado no es ingreso contratado. Registre versiones, fechas de caducidad, excepciones y quién puede validar cada documento.

Campus Horizonte | Primera matriz de decisión

Expediente hipotético H-02 (antes de la decisión final de inversión). El caso parte deliberadamente de evidencia incompleta; no existe ningún permiso, contrato de potencia o prueba real asociado a un terreno específico. Las clasificaciones siguientes son un ejercicio de diligencia, no un dictamen sobre un proyecto existente.

Puerta	Estado del caso hipotético	Hito y evidencia para levantar la condición
1. Demanda	Condicionada	Cliente, tarifa, reservas y contrato vinculante
2. Terreno	En investigación	Título, estudios, permisos y servidumbres
3. Energía	No demostrada	Acuerdo, MW/MVA firmes, costos y fecha
4. Conectividad	Condicionada	Trazados y contratos de rutas independientes
5. Diseño y operación	En investigación	Envolventes IT, térmica, seguridad y turnos
6. Construcción	En investigación	Presupuesto, cronograma, suministro y pruebas
7. Retorno	No demostrada	Flujos completos, deuda, sensibilidades y umbral

Preguntas de aplicación

1. ¿Cuál de las siete puertas sigue condicionada y qué evidencia, responsable y fecha deben cerrarse antes del siguiente compromiso de capital?
2. ¿Qué puerta contiene un bloqueo que las demás evidencias no pueden compensar?
3. ¿Quién valida la evidencia, en qué fecha vence y qué decisión habilita?

Práctica de evaluación. Marque cada puerta con un estado, escriba el documento que lo justifica y formule una condición precedente para avanzar. Añada la pérdida que se intenta evitar y la partida de presupuesto para cerrar la brecha.

Decisión de diseño. Presente una recomendación con cuatro opciones: avanzar, avanzar sujeto a condiciones, mantener opcionalidad mientras se valida o detenerse. Incluya evidencias, riesgos residuales,

responsables, fechas y monto máximo de capital expuesto antes del siguiente hito.

7. El caso de inversión: capacidad, costos y escenarios

Objetivo del capítulo: montar un modelo financiero comprensible y verificar cómo cambian sus resultados cuando se mueve una fecha, una carga o un costo.

Arme el modelo desde la capacidad entregable

La primera hoja no debería empezar con ingresos. Empiece con un registro de capacidad por fase: potencia solicitada, comprometida, energizada, carga de facility, capacidad IT, capacidad comercializable, capacidad contratada y capacidad facturable. Marque la frontera de cada cifra y evite usar el mismo MW en varias categorías.

Un modelo simple de ingresos recurrentes por capacidad puede expresarse como:

Ingreso de capacidad = kW facturables × tarifa pactada por kW-mes × meses en servicio.

Los cargos por energía se modelan aparte con el mecanismo contractual, la medición y la recuperación acordados. Los cross-connects, manos remotas, servicios gestionados y otros productos se proyectan por cantidad, precio y tasa de activación. No se debe contar dos veces una reserva y la misma capacidad ya facturada como servicio.

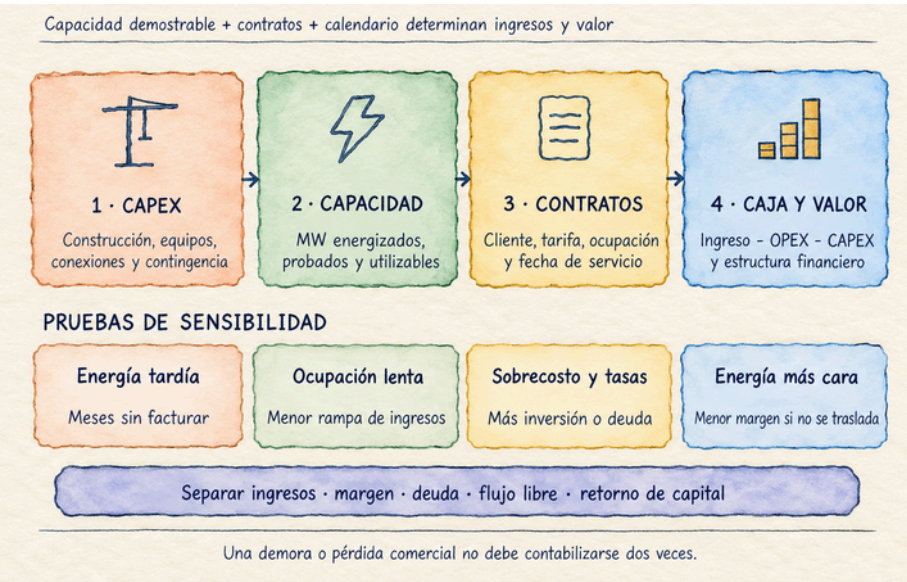


Figura 9. Del CAPEX al flujo de caja del activo

Lectura. El modelo financiero empieza con alcance y calendario de inversión, sigue con MW energizados y aceptados, y luego incorpora contratos, ocupación, ingresos y caja. Los escenarios de demora, menor cliente ancla, energía costosa, CAPEX y deuda se modelan con supuestos visibles y sin contar dos veces un mismo efecto.

Incluya el costo completo y el calendario de caja

Inversión / costo	Partidas que suelen quedar fuera de un primer presupuesto
Terreno y sitio	Due diligence, adquisición, derechos, estudios, accesos, mitigaciones y permisos
Red eléctrica	Conexión, subestación, líneas, transformadores, respaldo, almacenamiento y pruebas
Edificio y facility	Estructura, MEP, protección, refrigeración, instrumentación y repuestos críticos
Telecomunicaciones	Ductos, cámaras, derechos de paso, entradas, MMR, fibra, equipos, rutas y puesta en servicio
Desarrollo	Diseño, PMO, supervisión, owner's costs, seguros, financiación, contingencia e impuestos

Inversión / costo	Partidas que suelen quedar fuera de un primer presupuesto
Operación	Turnos, capacitación, mantenimiento, combustible, agua, electricidad, carrier, seguridad y compliance
Renovación	Reemplazos por ciclo, cambios de densidad, nueva óptica, firmware, baterías y obsolescencia

Un modelo con CAPEX por MW no reemplaza el calendario de desembolsos, los cambios de alcance ni la prueba de qué se puede facturar. Una variación de plazo afecta intereses, costos de sitio, contratación, hitos de cliente y flujo de ingresos. El costo de demora debe construirse con partidas separadas para evitar doble conteo.

Sensibilidad y decisión por etapas

Como mínimo, el caso base, adverso y favorable deben variar fecha de energización; cierre y entrada de clientes; ocupación; costo y plazo de equipos; precio de energía; costo de agua; densidad IT; tipo de cambio; tasas; costo de construcción; duración de permisos; y capacidad que sobrevive al evento de diseño. El análisis debe identificar qué variable explica el resultado y qué decisión puede controlarla.

Un campus hipotético de 240 MW IT dividido en tres bloques de 80 MW permite ensayar una expansión por fases. Si un contrato activa 60 MW facturables en el primer bloque, el ingreso de capacidad se calcula con 60.000 kW por la tarifa pactada y los meses en servicio; a US$145 por kW-mes, son US$104,4 millones brutos por doce meses completos. A US$11 millones/MW, el supuesto de CAPEX de infraestructura asciende a US$2.640 millones; el rango de US$8,6–12 millones/MW daría US$2.064–2.880 millones, solo si se normalizan alcance y denominador. La energía y otros servicios se modelan por separado. El caso compara construir los 240 MW desde el inicio con autorizar cada bloque al cerrar hitos de energía,

demanda, permisos y financiación. La tarifa y los costos son supuestos de aula, no una oferta ni una tarifa chilena.

Ejercicio financiero didáctico: campus hipotético de 120 MW IT

Los valores son supuestos de aula, no precios de mercado ni una recomendación para un emplazamiento real. El modelo representa una fase de 120 MW IT con CAPEX de infraestructura de US$1.320 millones, calculado a US$11 millones por MW IT. Como referencias publicadas, Gleeds reporta US$8,6–10,9 millones/MW para Santiago y una presentación al Senado cita US$10–12 millones/MW de CAPEX de infraestructura para Chile [68, 69]. Los alcances y la base de MW no están definidos de forma homogénea; se usan solo como sensibilidad y deben normalizarse antes de presupuestar. El modelo separa servidores, GPU, terreno, financiamiento e infraestructura externa; el alcance del contrato debe confirmar qué incluye la cifra por MW. La tarifa didáctica es US$145/kW-mes, el OPEX fijo escala linealmente a US$48 millones anuales y excluye energía; el horizonte es 15 años, la tasa de descuento 10 % y la energía se cobra como pass-through. La capacidad facturable es 80 MW en el año 1, 100 MW en el año 2 y 120 MW desde el año 3.

Con esos supuestos, los ingresos de capacidad son US$139,20 millones, US$174 millones y US$208,80 millones en los años 1, 2 y desde el año 3, respectivamente. Después del OPEX fijo, el flujo operativo simplificado antes de impuestos y financiación es US$91,20 millones, US$126 millones y US$160,80 millones al año. El costo de la energía se cobra por separado y no se cuenta como margen de capacidad.

Tarifa (US$/kW-mes)	VAN a 10 % (US$ M)	TIR no apalancada
145	−189,0	7,6 %
160	−34,2	9,6 %
170	69,0	10,9 %

Con CAPEX de US$1.320 millones en el año 0, los flujos simplificados producen un VAN de −US$188,98 millones al 10 % y una TIR de 7,55 % durante 15 años, sin valor terminal. Al cambiar solo CAPEX a US$8,6 millones/MW, el VAN es aproximadamente +US$99 millones y la TIR 11,54 %; a US$12 millones/MW, el VAN cae a −US$308,98 millones y la TIR a 6,25 %. El resultado depende con fuerza del costo validado y de su frontera. Un atraso de seis meses sobre los 80 MW iniciales equivale a US$69,60 millones de ingreso bruto diferido al supuesto de tarifa; no es una pérdida automática y depende del contrato y de la aceptación.

Como comprobación separada, 80 MW IT con PUE de 1,30 representan aproximadamente 911.040 MWh anuales de consumo total en esa condición. A US$80/MWh, el costo energético ilustrativo sería US$72,88 millones al año. Si se transfiere íntegramente al cliente, no se cuenta como margen de capacidad; si el propietario absorbe precio, pérdidas o descalce horario, el modelo incorpora esa exposición. El PUE y el precio son supuestos del ejercicio, no un benchmark.

Los indicadores deben corresponder al modelo elegido: VAN y TIR para flujos y horizonte declarados; DSCR para cobertura de deuda; punto de equilibrio de ocupación; sensibilidad de valor ante retrasos; costo de expansión; concentración de ingresos y riesgo residual. No existe un umbral universal de retorno que compense una restricción crítica sin resolver.

Caso conductor Campus Horizonte: modelo integral de 500 MW IT

Expediente hipotético H-FIN. Este modelo constituye un ejercicio reproducible de estructura económica y financiación; NO es un presupuesto validado, una oferta de carrier, una previsión de ocupación local ni una autorización de inversión. Es independiente de los ejercicios de 120 y 240 MW. La cifra de US$11 millones/MW se utiliza únicamente como supuesto de aula para infraestructura y

exige normalizar alcance y denominador antes de emplearla en un proyecto real.

Calendario ilustrativo: cinco bloques de 100 MW IT con fechas de aceptación al comenzar los años 2, 3, 4, 5 y 6. Cada bloque requiere US$1.100 millones de CAPEX, desembolsados 35 % dos años antes y 65 % un año antes de su entrada. Se supone que puede cobrar 50 % de sus MW IT el primer año de servicio, 75 % el segundo, 90 % el tercero y 95 % desde el cuarto, sin exceder los MW físicamente aceptados. Esta curva es un objetivo comercial, no contratos firmados.

Tarifa base de capacidad: US$190/kW-mes; ingresos anuales en millones de US$ = MW facturables × tarifa × 0,012. OPEX fijo: US$28 millones anuales por bloque en servicio; OPEX variable: US$0,22 millones por MW facturable al año. Se reserva reposición y sostenimiento a razón de US$22 millones por bloque aceptado cada año (2 % de su CAPEX inicial). Electricidad, servidores, GPU y cargos pasados íntegramente al cliente no se incluyen como margen de capacidad: deben modelarse por separado en cada contrato.

Horizonte: años 0 a 20; depreciación didáctica lineal de 20 años desde la entrada en servicio; impuesto ilustrativo de 27 % sobre el resultado positivo de explotación antes de financiación (sin compensaciones fiscales de pérdidas); tasa de descuento del proyecto del 10 %. Se supone una venta al cierre del año 20 a 8 veces el EBITDA de ese año, sin atribuir carácter de benchmark al múltiplo. La valoración usa flujo libre para la firma sin intereses ni amortización de deuda para evitar doble conteo de financiación.

Financiación separada: 45 % de cada desembolso de obra se cubre con deuda y 55 % con aportes de capital. Interés contractual didáctico del 7 %; durante los años 0–5 se capitaliza sobre la deuda girada y desde el año 6 se paga junto con el principal, amortizado en 15 cuotas anuales constantes de principal (años 6–20). Es una simplificación de estructuración bancaria; en un crédito real deben

negociarse ratios, reservas, garantías, disposición, comisiones, calendarios, capitalización y covenants.

Tabla de flujos anuales del Campus Horizonte (escenario base; millones de US$)

Año	CAPEX (MUS$)	MW fact.	Ingreso (MUS$)	EBITDA (MUS$)	FCFF (MUS$)
0	385	0	0	0	-385
1	1.100	0	0	0	-1.100
2	1.100	50	114	75	-1.052
3	1.100	125	285	202	-967
4	1.100	215	490	359	-859
5	715	310	707	527	-359
6	0	405	923	694	471
7	0	450	1.026	787	539
8	0	470	1.072	828	569
9	0	475	1.083	838	576
10	0	475	1.083	838	576
11	0	475	1.083	838	576
12	0	475	1.083	838	576
13	0	475	1.083	838	576
14	0	475	1.083	838	576
15	0	475	1.083	838	576
16	0	475	1.083	838	576
17	0	475	1.083	838	576
18	0	475	1.083	838	576
19	0	475	1.083	838	576
20	0	475	1.083	838	7.284[1]

[1] El FCFF del año 20 incorpora exclusivamente en ese año el valor terminal supuesto de 8 × EBITDA. FCFF = EBITDA − impuesto no apalancado − reinversión anual − CAPEX inicial. Las cifras se muestran redondeadas; VAN y TIR se calculan con los valores sin redondeo.

Financiación, ratios bancarios y sensibilidad de inversión

El flujo de caja disponible para servicio de deuda (CFADS) es EBITDA menos impuesto calculado con intereses deducidos y menos reposición. El servicio anual de deuda suma interés del período y principal pagado; DSCR = CFADS / servicio de deuda. El flujo al accionista resta servicio de deuda y sus aportes de capital, y agrega el valor de salida una sola vez. Los cálculos se realizan con supuestos simplificados: sin cuentas por cobrar/pagar, sin arrastre de pérdidas fiscales y sin comisiones bancarias.

En el escenario base, al cierre del período de capitalización, la deuda asciende a US$3.121 millones, incluida la financiación de intereses durante construcción. El menor DSCR modelado es 1.24x y la TIR ilustrativa del capital es 11,3 %; ambos dependen del calendario de deuda, de la continuidad contractual y del valor de salida, y no deben interpretarse como bancabilidad certificada.

Conclusión de valor: el VAN del proyecto a 10 % es US$−154.6 millones y la TIR no apalancada es 9,6 %. Aunque los cinco bloques se acepten y la utilización alcance 95 %, en el escenario base NO se supera la tasa de descuento establecida. La decisión no es aprobar automáticamente el CAPEX de US$5.500 millones: es condicionar el gasto irreversible a demanda y suministro vinculantes, CAPEX validado y una rentabilidad revisada favorable.

Escenario	Tarifa (US$/kW-mes)	VAN (MUS$)	TIR proyecto	DSCR mínimo
Bajo (misma entrega)	175	−606.2	8,4 %	1.12x
Base	190	−154.6	9,6 %	1.24x
Mayor tarifa	205	+297.0	10,7 %	1.37x
Demora +1 año (misma obra)	190	−520.1	8,7 %	0.97x
Sin valor terminal	190	−1.151.7	5,9 %	1.24x

Lectura crítica. El escenario de demora mantiene el desembolso de CAPEX original y posterga un año la aceptación y la facturación;

esta diferencia mide exposición por obra financiada sin ingresos en el calendario previsto. El múltiplo de salida de 8 veces EBITDA es un supuesto sensible: sin salida, el caso base presenta un VAN mucho menor. La comparación no sustituye el tratamiento contractual de sobrecostos, créditos, penalizaciones y financiación.

Punto de equilibrio para aprobar: el comité debe derivar la tarifa mínima —o una reducción equivalente del CAPEX, riesgo o plazo— que eleva el VAN al menos a cero, respaldada por ofertas reales. Un VAN favorable no levanta restricciones legales, físicas ni operativas que estén abiertas.

Preguntas de aplicación

1. ¿Cómo cambian el flujo de caja y el retorno si se retrasan la energía, los permisos o los equipos mientras cae la utilización o aumenta el costo financiero?
2. ¿Qué variable desplaza el retorno con mayor rapidez y con cuál se correlaciona?
3. ¿Qué supuestos, fuentes y flujos permiten reproducir el escenario financiero?

Memorando de inversión

El memo final debe caber en una decisión ejecutiva: activo, cliente, producto, capacidad por fase, calendario, derechos, energía, conectividad, permisos, inversión, ingresos, financiamiento, escenarios, riesgos, condiciones precedentes, responsable, siguiente hito y monto expuesto. Adjunte la evidencia, no solo la narrativa.

Decisión de diseño. No apruebe un modelo que solo funcione con energización temprana, ocupación inmediata y costo de construcción perfecto. Identifique el caso adverso, el capital expuesto en cada hito y la condición que permite suspender o redimensionar la siguiente fase.

8. Adquirir, transformar y gestionar activos durante su vida

Objetivo del capítulo: organizar la due diligence de un activo existente y distinguir una oportunidad de expansión de un pasivo heredado.

Greenfield, brownfield y adquisición

Una nueva construcción ofrece mayor libertad de diseño y más incertidumbre de permisos, conexión, calendario y demanda. Una ampliación brownfield permite aprovechar infraestructura existente, pero depende de capacidad residual y de interfaces en operación. Una adquisición de un centro en servicio puede aportar contratos, clientes, personal, historial y permisos; también puede traer deuda técnica, equipos envejecidos, derechos débiles, mantenimientos diferidos o riesgos que no aparecen en la presentación comercial.

01	**Ingresos** EVIDENCIA QUE SE DEBE CONCILIAR	Contratos, ocupación, tarifas, ajustes, depósitos, descuentos, vencimientos y concentración
02	**Potencia y refrigeración** EVIDENCIA QUE SE DEBE CONCILIAR	Cargas observadas, capacidad sobreviviente, pruebas, márgenes, obsolescencia y mantenimiento
03	**Conectividad** EVIDENCIA QUE SE DEBE CONCILIAR	Contratos, rutas físicas, MMR, cross-connects, puertos, carriers, diversidad y obligaciones de reparación
04	**Seguridad y cumplimiento** EVIDENCIA QUE SE DEBE CONCILIAR	Incidentes, auditorías, controles, permisos, reclamos, obligaciones locales y límites de responsabilidad

05	**Planta y condición** EVIDENCIA QUE SE DEBE CONCILIAR	As-built, repuestos, edad, historial de fallas, modificaciones, garantías y deuda de mantenimiento
06	**Organización** EVIDENCIA QUE SE DEBE CONCILIAR	Competencias, turnos, subcontratos, dependencia de personas clave y transferencia de conocimiento
07	**Expansión** EVIDENCIA QUE SE DEBE CONCILIAR	Suelo, energía, agua, derechos de paso, calendario, límites de campus y costo de integración

Conciliar la sala de datos con la realidad es esencial. Las facturas y contratos deben cuadrar con mediciones; los planos con inspecciones; las rutas con registros y recorridos; la disponibilidad reportada con incidentes; la capacidad anunciada con ensayos; y el gasto de mantenimiento con la condición de activos. Un informe de due diligence técnica debe informar estado, capacidad, vida remanente, riesgos, mitigaciones y opciones de inversión; esos son usos centrales de los servicios de revisión técnica de activos y proyectos nuevos [28].



Figura 10. Ciclo de vida de un activo de centro de datos

Lectura. El activo cambia de riesgo en cada etapa: en desarrollo domina la incertidumbre de permisos y potencia; en construcción, costo y calendario; en operación, disponibilidad, mantenimiento, clientes y obsolescencia; en salida, la capacidad de transferir contratos, derechos e historial. La diligencia acompaña toda la vida del activo.

De la compra a la gestión de portafolio

Después del cierre, el nuevo dueño necesita un plan de 100 días: proteger continuidad, validar contratos y accesos, congelar cambios de alto riesgo, inspeccionar equipos críticos, reconstruir el registro de capacidad, revisar rutas y actualizar el calendario de mantenimientos. Luego prioriza inversiones: mantener, reemplazar, densificar, añadir refrigeración líquida, incorporar potencia, cambiar el modelo comercial o retirar la capacidad.

La calidad ambiental y la relación con la comunidad pertenecen a la misma diligencia financiera. Riesgos de energía, agua, ruido, emisiones locales y disponibilidad de recursos pueden traer demoras, restricciones operativas y costos futuros [26, 27]. La evaluación debe registrar escenario, jurisdicción, fuentes de datos y mitigación pactada.

Campus Horizonte | Gobernar la opción de inversión

Expediente hipotético H-03. Una opción contractual sobre un terreno, en vez de una compra irreversible inmediata, preservaría margen de salida mientras se tramitan conexión, permisos y rutas. La decisión de extender o ejecutar la opción debe reunir costo de espera, penalidad de abandono, fecha de vencimiento, presupuesto de estudios y responsable. Ningún bloque pasa a construcción solo por el anuncio de 500 MW IT.

Preguntas de aplicación

1. ¿Qué derechos, obligaciones, costos de remediación y riesgos de transición pasan al comprador, y qué evidencia sustenta el valor del activo en cada etapa?
2. ¿Qué obligación heredada podría impedir operar o ampliar el activo adquirido?
3. ¿Qué as-built, inspección y registro revelan la condición real del activo?

Preparar el activo para crecer o vender

Un activo es más fácil de financiar, operar o transferir cuando su capacidad está trazada, los contratos coinciden con la capacidad entregable, la condición de equipos es conocida, las pruebas son reproducibles y la operación conserva procedimientos vigentes. El registro debe incluir lo que falta y la exposición aceptada. La valoración depende de mercado, contratos, riesgos, costos y jurisdicción; la descripción técnica no reemplaza la valoración financiera ni legal.

Decisión de diseño. Antes de comprar, exija evidencia independiente para cada afirmación crítica y convierta los hallazgos en acciones con responsable, costo, fecha e impacto.

Hitos que evitan comprometer el capital antes de tiempo

Hito 1 — Terreno: opción vigente, títulos y ruta de permisos revisados; se autorizan únicamente estudios y gastos acotados.

Hito 2 — Potencia y agua: capacidad, punto de conexión, fecha, suministros y restricciones documentados; no basta una respuesta preliminar.

Hito 3 — Demanda y contrato: comprador, producto, cronograma, tarifa, garantías y obligaciones ejecutables para cada fase.

Hito 4 — Diseño, conectividad y seguridad: rutas físicamente contrastadas, capacidad térmica, arquitectura de respaldo y pruebas planificadas.

Hito 5 — Decisión final de inversión: CAPEX normalizado, VAN/TIR/DSCR, riesgos residuales, presupuesto máximo, responsables y condiciones de desembolso.

Parte II · Diseñar el activo crítico

9. El centro de datos como sistema crítico

Objetivo del capítulo: mapear las dependencias entre facility, IT, telecomunicaciones y el servicio contratado.

La función es prestar un servicio digital

Un centro de datos aloja, alimenta, refrigera, conecta, protege y permite operar sistemas de información. No es solo una sala con servidores ni un edificio con equipos de respaldo. Es una infraestructura coordinada cuyo producto es el servicio digital que recibe un cliente, una empresa, una plataforma pública o una carga de cómputo.

El sistema se puede leer en tres planos que deben permanecer alineados:

Plano	Función	Evidencia de que cumple
Facility	Alojar, alimentar, refrigerar y proteger	Planos, pruebas integradas, alarmas y capacidad demostrada
IT y telecomunicaciones	Procesar, almacenar y transportar información	Inventario, configuración, pruebas de red y telemetría
Servicio	Entregar continuidad, rendimiento y recuperación	SLO/SLA, mediciones extremo a extremo y resultados de incidentes

El resultado depende de interfaces entre planos. Un rack puede estar energizado y seguir fuera de servicio porque no tiene frío suficiente, acceso a red, un cross-connect aceptado o una política de seguridad habilitada. Una ruta de fibra puede estar certificada y no resolver la continuidad si sus dos extremos dependen del mismo

suministro eléctrico. El análisis del sistema busca estos límites antes de que se conviertan en fallas.

Mapa funcional de la infraestructura

La arquitectura completa abarca territorio, edificio, equipos de soporte, plataformas IT y operación. Cada dominio necesita dueño, capacidad, criterio de aceptación y registro actualizado.

Dominio	Pregunta de diseño	Ejemplos de activos
Territorio y servicios	¿Puede el emplazamiento habilitarse y crecer?	Suelo, accesos, agua, permisos, electricidad y derechos de vía
Edificio y espacio técnico	¿Se puede instalar, mover y mantener cada sistema?	Estructura, salas, racks, rutas de cable y zonas de trabajo
Energía	¿Cómo llega y se sostiene la potencia crítica?	Subestación, tableros, UPS, baterías, generadores y distribución
Refrigeración	¿Cómo se extrae el calor en operación normal y degradada?	Unidades de precisión, chillers, bombas, CDU, sensores y tuberías
Conectividad	¿Cómo entran y salen datos con capacidad y diversidad verificables?	Fibra, MMR, carriers, switches, rutas y sistemas de gestión
Protección y operación	¿Cómo se detectan, contienen y resuelven eventos?	Accesos, CCTV, detección y supresión de incendio, BMS, EPMS, DCIM

La matriz de interfaces debe registrar energía, espacio, control, telecomunicaciones, seguridad, mantenimiento y datos intercambiados. Una interfaz sin responsable, señal o prueba es una brecha de diseño.



Figura 11. Del territorio al servicio: dominios que deben coordinarse

Lectura. La figura recorre el vínculo entre territorio, infraestructura crítica, telecomunicaciones y servicio digital. Los dominios pueden pertenecer a organizaciones distintas; por eso cada interfaz necesita capacidad, responsable, criterio de aceptación y evidencia vigente.

Marcos técnicos que organizan la disciplina

El entorno internacional no tiene una única norma que reemplace a todas las demás. Los marcos se complementan y difieren en alcance, lenguaje y método de verificación.

Marco	Aporte principal	Uso correcto
ISO/IEC 22237	Conceptos y requisitos para instalaciones, edificio, energía, control ambiental, cableado, seguridad y operación	Armar una arquitectura transversal y comprobar qué partes aplican al proyecto
EN 50600	Familia europea para instalaciones e infraestructuras de centros de datos	Referencia regional para disponibilidad, seguridad, eficiencia y operación

Marco	Aporte principal	Uso correcto
ANSI/TIA-942-C	Infraestructura de centros de datos y cuartos de cómputo	Especificar espacios, rutas y sistemas; validar el alcance de la evaluación o certificación
ANSI/BICSI 002-2024	Buenas prácticas de diseño e implementación multidisciplinaria	Desarrollar criterios y coordinación de diseño
Uptime Institute Tier	Resultados de topología y sostenibilidad operacional bajo su propio sistema	Evaluar objetivos y certificación dentro del programa Uptime
ASHRAE, IEC, NFPA, IEEE, ITU e IETF	Requisitos y guías de dominios concretos	Consultar el tema pertinente, la edición vigente y el código local adoptado

Una certificación o clasificación responde solo por el alcance que declara. No constituye por sí sola una garantía de conectividad exterior, seguridad operacional, rendimiento de aplicación o disponibilidad contractual. ANSI/TIA-942-C y Uptime Tier emplean programas y criterios distintos; sus etiquetas no deben tratarse como equivalencias automáticas [1–5, 15–19].

La evidencia atraviesa el ciclo de vida

El mismo requisito debe conservar su sentido desde la inversión hasta la operación. En diseño se expresa como capacidad y escenario de falla; en construcción, como instalación conforme; en commissioning, como prueba; en operación, como indicador, procedimiento y registro. Así se puede saber si el activo que se construyó es el mismo que se aprobó y si todavía conserva la capacidad para el servicio.

Gobernanza y soberanía digital: quién decide y quién responde

La infraestructura digital combina activos privados, servicios públicos, redes transfronterizas y dependencias de proveedores. La soberanía digital no exige que cada componente sea nacional ni que los datos nunca crucen fronteras. En términos operacionales, significa que una organización o un país puede conocer, gobernar, proteger y, cuando sea necesario, cambiar las dependencias que sostienen sus funciones: datos y jurisdicción; energía y rutas; proveedores; controles; capacidades locales; acceso de emergencia; y posibilidad de continuidad o salida.

La gobernanza define quién decide sobre inversiones, riesgo, clasificación, acceso, incidentes, cambios, datos y recuperación. El Estado puede establecer políticas, permisos, obligaciones de ciberseguridad, protección de datos y continuidad de servicios esenciales. Municipios y autoridades sectoriales administran aspectos territoriales, obras y derechos de paso. El dueño del centro de datos responde por el activo dentro de su alcance; el operador mantiene controles y servicios; carriers y proveedores operan segmentos contratados; clientes determinan cargas, datos y tolerancias. Una función crítica necesita un responsable final, un ejecutor, una fuente de evidencia y una autoridad que acepte el riesgo residual.

Dominio de decisión	Responsable típico	Evidencia para ejercer gobernanza
Clasificación y obligaciones	Estado, regulador y entidad designada según jurisdicción	Norma vigente, clasificación, alcance, fecha y responsable legal
Datos y servicios	Propietario del proceso y responsable de datos	Inventario, ubicación, retención, transferencia, respaldo y portabilidad

Dominio de decisión	Responsable típico	Evidencia para ejercer gobernanza
Infraestructura del campus	Dueño del activo y operador	Planos, contratos, riesgos, controles, auditorías y plan de continuidad
Rutas de telecomunicaciones	Carrier, dueño de ductos y cliente del servicio	Inventario de trazados, derechos de uso, dependencias y prueba de diversidad
Terceros y nube	Comprador, proveedor y áreas de riesgo	Subcontratistas, regiones, acceso privilegiado, salida y recuperación
Incidente sistémico	Dirección de crisis con NOC, SOC, facility y autoridades	Umbral de activación, cadena de mando, comunicación y registro de decisiones
Capacidades locales	Operador, instituciones formativas y autoridades	Cobertura de turnos, competencias, sucesión, repuestos y contratos de apoyo

La gobernanza es parte de la ingeniería porque determina qué se mide, qué se protege y quién puede actuar cuando el diseño se desvía. NIST CSF 2.0 formaliza una función Govern junto con Identify, Protect, Detect, Respond y Recover, ofreciendo un marco para integrar prioridades y supervisión, no una receta de cumplimiento automático [47]. Chile y la Unión Europea ilustran enfoques jurídicos distintos sobre ciberseguridad y resiliencia de entidades críticas; la aplicabilidad depende de la clasificación, la entidad y las normas vigentes, y no debe presumirse solo por operar un centro de datos [49, 50].

Un análisis de soberanía pregunta dónde están los datos y las claves; qué entidades tienen acceso; qué redes controlan la ruta; si se puede migrar a otro proveedor; cuánto tarda la salida; qué ocurre si una frontera, proveedor o cable queda indisponible; qué autoridad puede ordenar o coordinar acciones; y si la organización puede operar durante una desconexión temporal. Un registro de

dependencias estratégicas permite decidir qué se diversifica y qué se acepta. La autosuficiencia completa raramente es realista; la dependencia ciega sí puede evitarse.

Preguntas de aplicación

1. ¿Qué servicio debe seguir funcionando ante una falla y qué interfaces entre facility, IT, conectividad y operación deben probarse para demostrarlo?
2. ¿Qué falla común puede anular el diseño aunque cada componente funcione por separado?
3. ¿Qué ensayo integrado, procedimiento y responsable confirman continuidad operativa?

Práctica de dominio

Dibuje un servicio desde el rack hasta el usuario. Marque las fronteras, responsables, dependencias y evidencias que probarían la entrega.

Decisión de diseño. Defina el servicio que el sitio debe prestar, trace sus dependencias y asigne un dueño a cada interfaz entre facility, IT, conectividad y operación. Use las normas como marcos complementarios y registre el alcance de cada evaluación.

10. Tipologías, capacidad y disponibilidad

Objetivo del capítulo: definir tipología, capacidad útil y objetivo de disponibilidad para una carga identificada.

La misión determina la arquitectura

Los centros de datos se clasifican por su función, modelo comercial, escala, ubicación y perfil de carga. Una empresa puede operar una instalación propia, contratar colocation o consumir una región de nube. Un campus hyperscale puede alojar grandes zonas de servidores; un nodo edge puede priorizar proximidad y operación remota; una AI factory puede requerir densidades térmicas y redes internas distintas de una instalación empresarial tradicional.

Tipología	Misión frecuente	Conectividad y redundancia que se deben definir
Empresarial o privada	Sistemas internos, nube privada y aplicaciones corporativas	Conexión con sedes, nubes y respaldos; determinar si las rutas A/B son físicas y si cumplen RTO/RPO
Colocation retail y carrier-neutral	Alojar múltiples clientes y operadores	MMR, carriers y cross-connects; probar diversidad entre edificios, entradas, ductos y puntos de presencia
Wholesale, hyperscale o build-to-suit	Entregar bloques grandes a uno o pocos clientes	Backhaul y DCI por fases; demostrar capacidad, rutas independientes y fechas comprometidas
Cloud regional	Servir cargas y clientes de una región	On-ramps y conexiones privadas; medir los caminos a cada región y distinguirlos del acceso público a Internet
HPC y AI factory	Entrenamiento, inferencia y cómputo de alto desempeño	Separar y probar el fabric interno de alto ancho de banda, el DCI y la conectividad externa del campus

Tipología	Misión frecuente	Conectividad y redundancia que se deben definir
Edge y telecom	Acercar cómputo a usuarios, redes o instalaciones industriales	Conectar al núcleo y a usuarios con baja latencia; definir qué funciones locales siguen durante pérdida de backhaul
Recuperación y continuidad	Restaurar datos o servicios desde otro sitio	Alinear replicación con RPO/RTO; probar separación geográfica, rutas y recuperación de servicio y datos
Modular o prefabricado	Desplegar capacidad en bloques repetibles	Aceptar cada interfaz interna y externa; comprobar capacidad, rutas y failover después del acople en sitio

Estas categorías se mezclan: un campus puede ser hyperscale, carrier-neutral y contener zonas de IA. La tipología comercial no define por sí sola la topología eléctrica, la densidad máxima, el perfil de riesgo ni el nivel de resiliencia.

Capacidad instalada, utilizable y sobreviviente

La capacidad nominal describe lo que el equipo puede entregar en condiciones definidas por fabricante. La capacidad utilizable descuenta límites de instalación, protección, ambiente, mantenimiento y distribución. La capacidad sobreviviente indica cuánto servicio puede conservarse después de una falla concreta. Las tres cifras deben aparecer separadas en el plan maestro y en el cálculo de crecimiento.

La disponibilidad del servicio también exige un punto de medición y un período. La disponibilidad de un UPS, de una sala o de una ruta no equivale automáticamente a la disponibilidad de la aplicación. La arquitectura puede reducir la probabilidad o el impacto de una falla; la operación determina si se detecta, aísla y recupera a tiempo.

Como medida observada, disponibilidad = tiempo en que el servicio satisface la condición acordada ÷ tiempo total del período de observación × 100 %. El cálculo solo es comparable cuando se publican el punto de medición, la condición de servicio, el período, las ventanas excluidas y el método para registrar degradación parcial.

Redundancia y mantenibilidad

Esquema	Lectura de capacidad	Riesgo que no resuelve por sí solo
N	Capacidad necesaria para la carga	La salida de un elemento puede reducir o interrumpir el servicio
N+1	N más una unidad de reserva	Puede haber rutas de distribución, controles o servicios comunes
2N	Dos cadenas nominalmente completas	Las cadenas pueden compartir emplazamiento, control, combustible o errores de operación
2(N+1)	Dos cadenas con reserva en cada una	Aumenta la complejidad; la independencia y la operación deben probarse

La pregunta no es cuántos equipos duplicados aparecen en el diagrama, sino qué elemento se puede retirar para mantenimiento, qué falla individual puede tolerarse y qué evento compartido puede afectar a ambas rutas. La mantenibilidad concurrente y la tolerancia a fallas son objetivos de arquitectura y procedimiento; no se obtienen solo comprando una unidad adicional.

Leer las clasificaciones con precisión

Uptime Institute define Tier I, II, III y IV mediante objetivos de topología y sostenibilidad operacional; no prescribe una tecnología

única. ANSI/TIA-942 posee su propio sistema de evaluación de infraestructura. Los niveles de una clasificación no son porcentajes universales de disponibilidad ni sustitutos de una evaluación de riesgos, contratos de servicio o pruebas de recuperación. La comparación exige revisar criterio, alcance, fase certificada y sistema de evaluación [1, 5].

Tipologías del centro de datos y quién asume cada papel

Las tipologías describen dimensiones diferentes y pueden combinarse. Colocation y wholesale son modelos de servicio y contratación; enterprise describe con frecuencia un centro usado por una misma organización; hyperscale alude a escala y arquitectura; edge describe una ubicación y función próximas a usuarios o procesos; AI Factory identifica una instalación optimizada para cómputo acelerado y cargas de IA, aunque el término no tiene una definición técnica universal. Una instalación puede ser hyperscale y construida a medida, operar con un cliente ancla y tener nodos edge o zonas de colocation dentro de su ecosistema.

Tipo	Uso y configuración habitual	Decisión que diferencia el riesgo
Enterprise o corporativo	Infraestructura propia para aplicaciones y datos de una organización	Capacidad interna, obsolescencia y costo de operar frente a contratar servicios
Colocation retail	Clientes ocupan racks, jaulas o salas; el operador aporta facility, energía, seguridad y conectividad	Ramp-up de múltiples clientes, densidad, cross-connects y mezcla de contratos
Wholesale	Un cliente o pocos clientes toman bloques de capacidad a gran escala	Concentración, duración del contrato y perfil de expansión del cliente
Hyperscale	Gran campus o región con arquitectura repetible y expansión por fases	Potencia, disponibilidad de suelo, cadena de suministro y sincronización de capacidad

Tipo	Uso y configuración habitual	Decisión que diferencia el riesgo
Build-to-suit	Diseño y construcción adaptados a requisitos de un cliente	Especificación, cambio, cancelación, aceptación y reutilización del activo
Edge	Instalación distribuida cerca de usuarios, sensores o procesos	Demanda local, operación remota, seguridad física y conectividad de backhaul
AI Factory	Cómputo acelerado integrado con redes de alta capacidad, almacenamiento, potencia y refrigeración	Utilización real, generación tecnológica, densidad térmica y rendimiento del clúster
Powered shell	Terreno y edificio habilitados con los sistemas descritos por el contrato	Demarcación exacta de obras, potencia, refrigeración, entrega y responsabilidad

Desarrollador, dueño, operador, cliente y financiador pueden ser entidades diferentes. El desarrollador controla el diseño, permisos y entrega; el propietario mantiene el activo o lo arrienda; el operador ejecuta servicios y mantenimiento; el cliente instala o consume carga; el financiador impone covenants y condiciones de desembolso. Cuando una entidad cumple varios roles, el contrato sigue definiendo quién es responsable. La due diligence identifica conflictos, interfaces y derechos de intervención antes de fijar la valoración.

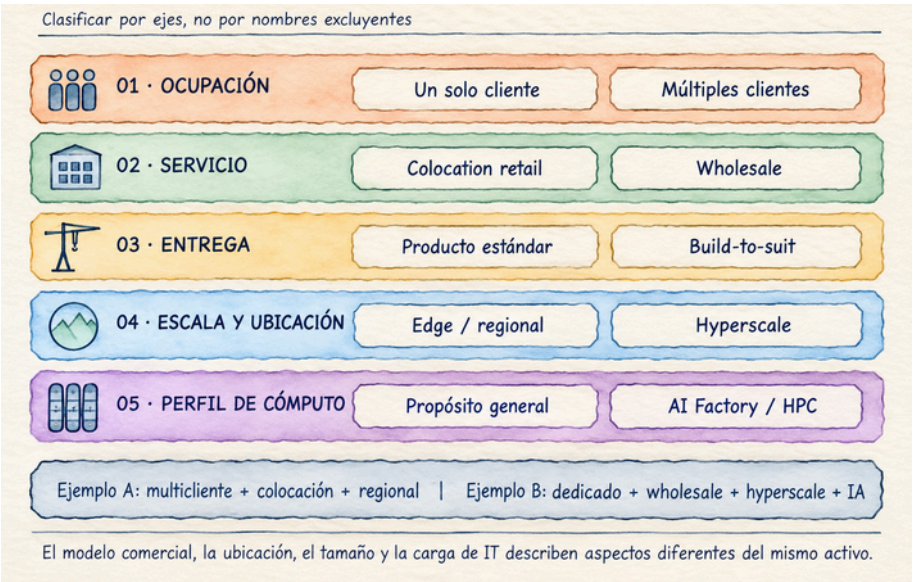


Figura 12. Tipologías que pueden combinarse en un mismo campus

Lectura. Enterprise, colocation, wholesale, edge, hyperscale y AI Factory describen ejes diferentes, no una clasificación excluyente. Un campus puede ser hyperscale, alojar un cliente único, vender wholesale y servir cargas de IA. El análisis indica por separado uso, escala, modelo comercial, propiedad y operador.

Preguntas de aplicación

1. ¿Qué tipología y nivel de disponibilidad necesita cada cliente, y cuánta capacidad sobrevive durante mantenimiento o la pérdida de un componente?
2. ¿Qué degradación de capacidad aparece durante mantenimiento o contingencia?
3. ¿Qué diseño, medición y prueba acreditan la disponibilidad prometida?

Práctica de dominio

Compare dos tipologías para una misma carga. Declare MW IT, potencia facility, capacidad sobreviviente, expansión y costo de cada alternativa.

Decisión de diseño. Dimensione capacidad y continuidad según carga, reserva, fallas, mantenimiento y alcance de la certificación declarada.

11. Sitio, edificio y distribución física

Objetivo del capítulo: revisar la aptitud del sitio, los espacios físicos y las interfaces del edificio.

Seleccionar territorio antes de diseñar salas

El emplazamiento condiciona la continuidad durante décadas. La revisión combina control del terreno, geotecnia, riesgo sísmico, inundación, incendios, vientos, clima, accesos, servicios públicos, disponibilidad de agua, permisos, impacto ambiental y relación con la comunidad. Ninguna tabla de puntaje debe ocultar una condición de descarte: un predio económico puede ser inviable si la conexión eléctrica, el permiso, la logística o el agua no llegan a tiempo.

El análisis debe documentar la condición y su evidencia, no solo el valor estimado. Un mapa de amenaza se valida con estudios del predio; una respuesta de utility se confirma con capacidad, plazo y obras; una ruta de fibra se confirma con recorridos y puntos de entrada. Se identifican riesgos físicos compartidos que puedan afectar simultáneamente energía, telecomunicaciones, acceso y evacuación.

Modelo AVC: siete puertas de la promesa a la evidencia

La evaluación detallada se desarrolla en los capítulos 5 y 6. En la selección de sitio, las siete puertas comprueban que demanda, territorio, energía, conectividad, diseño y operación, entrega, y retorno avanzan con fechas y condiciones compatibles.

Puerta	Evidencia para avanzar	Pregunta de decisión
Demanda y contratos	Cliente, producto, capacidad, obligación y calendario	¿Existe una misión comercial defendible para esta fase?

Puerta	Evidencia para avanzar	Pregunta de decisión
Terreno, derechos y permisos	Control, accesos, servidumbres, estudios y permisos	¿Se puede construir, reparar y ampliar?
Energía	Potencia, fecha, obras, costo, suministro y respaldo	¿Qué MW llegan a qué frontera y desde cuándo?
Conectividad	Rutas, carriers, capacidad, latencia y diversidad	¿El servicio conserva conectividad si falla una ruta?
Diseño y modelo operativo	Capacidad, refrigeración, agua, clima, seguridad y personal	¿La infraestructura cumple la carga y puede operarse?
Construcción y commissioning	CAPEX, suministros, cronograma, pruebas y aceptación	¿Se puede entregar a tiempo con alcance verificable?
Retorno, financiación y salida	Ingresos, OPEX, financiación, escenarios y valor residual	¿La caja y el riesgo justifican el capital comprometido?

Cada puerta tiene responsable, fuente, fecha, supuestos abiertos y consecuencia de incumplimiento. Una puntuación comparativa sirve solo después de revisar las condiciones de descarte.

Zonas, circulaciones y espacios de apoyo

La planta física ordena los equipos por función, criticidad, acceso y mantenimiento. El programa puede incluir white space, cuartos eléctricos, salas mecánicas, MMR, entrada de servicios, control de operaciones, seguridad, almacenamiento de repuestos, recepción y áreas de carga. Las circulaciones de personas, equipos, materiales y residuos se diseñan desde el inicio. Las rutas deben permitir instalar y reemplazar equipos sin invadir zonas que estén operando.

La separación entre zona de clientes, facility, telecomunicaciones y espacios de seguridad se documenta en planos y permisos de acceso. Las salas de entrada y las MMR se sitúan considerando rutas exteriores, acceso de operadores, independencia de caminos, energía de respaldo, climatización y trayectos hacia los racks.

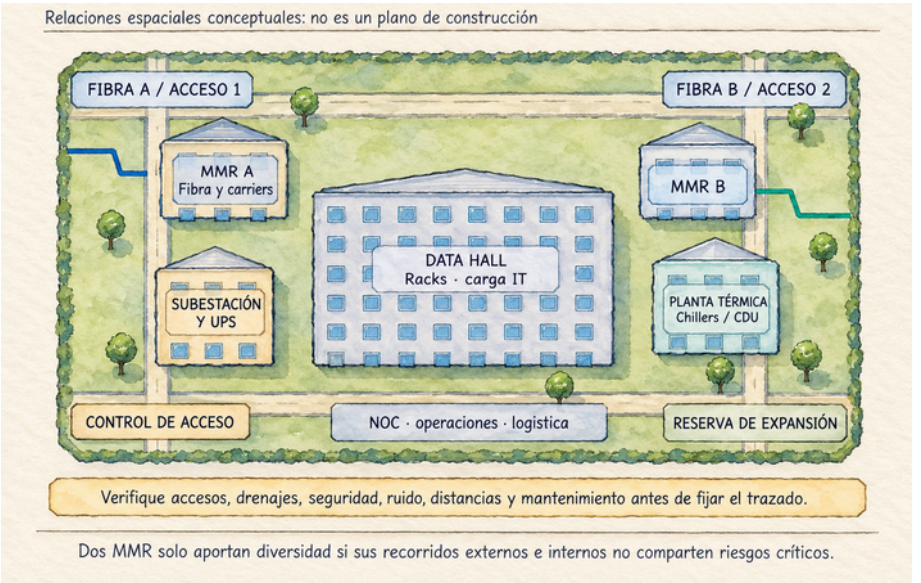


Figura 13. Zonificación funcional de un campus

Lectura. El esquema ordena el sitio por accesos, seguridad, energía, refrigeración, telecomunicaciones, salas de datos y logística. La ubicación definitiva responde al terreno, las rutas de fibra, drenajes, distancias de seguridad, permisos, expansión y mantenimiento. Es un diagrama de relaciones funcionales, no un plano constructivo.

Racks, estructura y rutas técnicas

El diseño del rack considera carga total y puntual, altura, profundidad, distribución de peso, flujo de aire, alimentación A/B, organización de cable, accesos delantero y posterior, radios de giro y espacio de retiro. Los requisitos estructurales se verifican con equipos reales o con envolventes conservadoras acordadas con fabricantes. También se planifican la ruta de traslado, el elevador, las puertas, las rampas y la maniobra de instalación.

El cableado puede recorrer un piso técnico o bandejas aéreas. La elección depende de cargas térmicas, estructura, facilidad de inspección, convivencia con energía, riesgo de agua, estrategia de expansión y mantenimiento. Ningún método elimina la necesidad de separar servicios, proteger radios de curvatura, controlar ocupación y actualizar los as-built. Los ductos, bandejas y penetraciones deben reservar espacio para potencia, fibra y cambios futuros sin crear cruces inaccesibles.

Alternativa de distribución	Ventaja de diseño	Control que exige
Piso técnico	Puede alojar suministro de aire y rutas bajo el piso cuando el diseño lo permite	Capacidad estructural, limpieza, obstrucciones, presión, fuga de agua y acceso a paneles
Bandejas aéreas	Hace visible y accesible la ruta de cables y servicios suspendidos	Soportes, carga, coordinación con luminarias y tuberías, separación y acceso seguro

La elección responde a cómo se mueve el aire y cómo se instalarán y mantendrán los servicios en ese proyecto; no se decide por costumbre ni convierte por sí sola a una sala en eficiente.

Diseño para crecimiento y mantenimiento

El plan maestro reserva áreas para fases futuras, equipos de potencia, plantas de refrigeración, accesos de construcción, rutas de cable, almacenamiento y patios técnicos. Los límites de expansión deben ser explícitos: terreno, energía, capacidad térmica, agua, permisos, conexión externa o mercado. Una fase inicial no debe ocupar el corredor que necesitará la siguiente.

Campus Horizonte | Selección de sitio

Expediente hipotético H-04. La ficha del emplazamiento aún tiene vacías las casillas de título, geotecnia, servidumbres, acceso de maquinaria, riesgo sísmico, agua y conexión a la red. El estado

correcto es «en investigación». Para la primera fase se reserva en plano —sin atribuir disponibilidad real— espacio para subestación, cinco bloques, accesos logísticos y dos entradas de fibra que no compartan el mismo punto de falla.

La autorización de ingeniería de detalle exige planos coordinados y condiciones de descarte por escrito. La zonificación teórica y un mapa de operadores no reemplazan autorización municipal, servidumbre ni inspección técnica.

Preguntas de aplicación

1. ¿Qué condición del terreno, de los permisos o de las servidumbres podría bloquear la construcción o impedir la expansión prevista?
2. ¿Qué riesgo geotécnico, ambiental o de acceso vuelve inviable el emplazamiento?
3. ¿Qué informe, permiso y estudio verifican que el terreno admite la fase prevista?

Práctica de dominio

Compare sitios con evidencia: amenazas, accesos, permisos, logística, servicios, rutas y áreas de crecimiento.

12. La cadena de potencia: de la red al rack

Objetivo del capítulo: seguir la cadena eléctrica desde la red hasta el rack y distinguir potencia nominal de potencia entregable.

Distinguir potencia y energía

MW expresa potencia; MWh expresa energía acumulada; MVA representa potencia aparente y se relaciona con la potencia activa mediante el factor de potencia. MW contratados, potencia de campus, carga IT y carga crítica no significan lo mismo. El balance debe mostrar la frontera de medición, los factores de conversión, las pérdidas, los auxiliares y la reserva por fase.

La demanda se modela con perfiles horarios y escenarios de crecimiento. Un inventario de servidores no basta: se incorporan aceleradores, almacenamiento, red, bombas, ventiladores, UPS, iluminación, seguridad y otros sistemas. La proyección considera estados normal, de mantenimiento, falla y recuperación. La reserva no equivale a capacidad instalable si faltan transformadores, espacio, permisos o alimentación aguas arriba.

Una conversión sencilla muestra por qué la frontera de medición importa. Supóngase una fase de **50 MW IT** y un PUE de diseño de **1,25** en la condición especificada. La potencia total del sitio sería del orden de **62,5 MW** en esa condición. Si el factor de potencia de diseño fuera 0,95, la potencia aparente sería aproximadamente **65,8 MVA** antes de incorporar márgenes de proyecto, condiciones de carga, pérdidas aguas arriba, redundancia y límites de conexión. El cálculo es ilustrativo: el PUE medido en operación, la carga parcial, la temperatura, la topología y los criterios de reserva pueden cambiar el resultado. El cliente debe ver el unifilar, la frontera de cada cifra y el escenario que se usó.

Seguir la ruta eléctrica completa

Tramo	Función	Evidencia a solicitar
Utility y punto de conexión	Entregar potencia con condiciones y fecha definidas	Estudios, contrato, tensión, obras, límites y fecha de energización
Subestación y transformación	Adecuar tensión y proteger la conexión	Capacidad, redundancia, coordinación de protecciones y pruebas
Generación y transferencia	Sostener cargas cuando la red falla	Capacidad a condiciones locales, secuencia de arranque, combustible y pruebas
UPS y almacenamiento	Proteger continuidad y calidad de energía durante la transición	Curvas de carga, autonomía útil, modo de operación, bypass y mantenimiento
Distribución crítica	Llevar energía a tableros y zonas de IT	Diagrama unifilar, selectividad, medición, separación de rutas y enclavamientos
PDU o busway hasta rack	Distribuir alimentación A/B y medir consumo	Capacidad, protección, balance de fases, alarmas y trazabilidad por rack

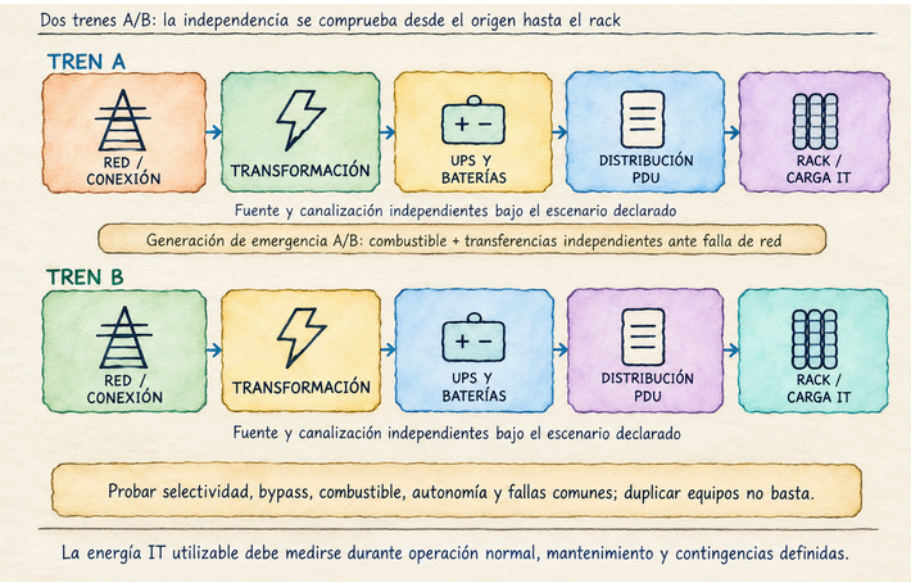


Figura 14. Cadena eléctrica desde la conexión hasta la carga IT

Lectura. La cadena se diseña de extremo a extremo. El punto de falla puede estar en una transferencia automática, un tablero, una barra, un breaker, una PDU o un cable de alimentación del servidor. Cada elemento se coordina con protección, control, mantenimiento y procedimiento de retorno.

Time to power: la secuencia que determina la fecha de servicio

La potencia anunciada para un terreno puede depender de una cadena de estudios, permisos, obras y equipos que tienen responsables y calendarios distintos. Para un inversionista, la fecha de potencia disponible es una variable de ingreso: determina cuándo se energizan equipos, cuándo se acepta la carga y cuándo comienza la facturación. El tiempo de entrega debe modelarse por hitos, dependencias y rutas críticas, no como una sola cifra de la utility.

Hito	Pregunta que cierra	Evidencia para la decisión
Solicitud y perfil de carga	¿Qué demanda se pide, en qué fases y con qué rampas?	Curva horaria, fase, factor de carga, fecha objetivo y tolerancia

Hito	Pregunta que cierra	Evidencia para la decisión
Estudio de conexión	¿Qué obras y límites exige la red para atender la carga?	Estudio de impacto, restricciones, contingencias, alcance y costo
Acuerdo de capacidad	¿Qué capacidad queda reservada y bajo qué condiciones?	Acuerdo ejecutable, punto de conexión, firmeza, hitos y penalidades
Infraestructura de red	¿Hay que ampliar transmisión, subestación o distribución?	Permisos, diseño, responsable, presupuesto y cronograma de cada obra
Equipos críticos	¿Cuándo llegan transformadores, interruptores y protecciones?	Orden de compra, fabricante, fecha contractual, FAT y logística
Obra del campus	¿Qué edificios, ductos y sistemas deben estar listos?	Plan integrado del EPC, interfaces y fechas de liberación
Energización y aceptación	¿Qué pruebas permiten recibir carga de manera segura?	Plan de comisionamiento, testigos, criterios y acta de energización

El orden real puede variar por jurisdicción y por activo. Un transformador puede comprarse antes de completar el permiso de obras; una utility puede exigir que ciertos estudios se repitan si cambia la carga; una fecha de conexión puede depender de un tercero que no firma el contrato del centro. La matriz de riesgos asigna dueño, holgura, costo de demora y plan alternativo a cada dependencia. La fecha debe clasificarse como objetivo, estimada, reservada o contractual; estas expresiones no son equivalentes.

El expediente de energía también debe separar MW disponibles hoy, MW asignados a la fase, capacidad que depende de obras futuras y capacidad potencial del predio. La expansión escalonada reduce capital inmovilizado si la demanda acompaña, pero solo funciona cuando la utility, el terreno, el espacio de subestación, la

distribución interna, el suministro de equipos y las reservas de potencia se coordinan por fases. Un bloque de IT no está listo porque el edificio lo esté: debe coincidir su fecha con conexión, transformación, distribución, refrigeración, red y aceptación.

UPS, baterías, generadores y BESS

El UPS mantiene energía acondicionada durante la perturbación y da tiempo a transferir o recuperar la fuente. Existen topologías como standby, línea interactiva y doble conversión en línea; la selección depende de la criticidad, las características de carga, la calidad de suministro, la eficiencia, el mantenimiento, el bypass y la compatibilidad del sistema. La autonomía de baterías se calcula para la carga, la temperatura, el envejecimiento permitido y la condición final de descarga, no solo con la cifra de catálogo.

Los generadores y su sistema de transferencia se evalúan por disponibilidad, arranque, estabilización, combustible, emisiones, ruido, logística, mantenimiento y condiciones ambientales. El tiempo de respaldo contractual debe incluir reposición de combustible y los casos en que el suministro eléctrico permanezca degradado. Una prueba en vacío no demuestra comportamiento bajo carga ni la transición completa.

El BESS puede ofrecer almacenamiento, gestión de demanda, soporte de red o flexibilidad, según el diseño y los controles. No se debe confundir automáticamente con un UPS ni con el grupo electrógeno: cada equipo cumple una función, duración, perfil de potencia y criterio de aceptación propios. Las renovables y los contratos de energía pueden aportar atributos ambientales o reducir costos, pero no reemplazan la evaluación de potencia firme ni la arquitectura local de respaldo.

Fuentes de energía y su función en el centro de datos

La red eléctrica entrega una mezcla que varía por mercado, hora y estación. Una declaración comercial de energía renovable no describe por sí sola la fuente física que alimenta el sitio ni garantiza

disponibilidad continua. La IEA distingue en su análisis la mezcla físicamente consumida de los contratos y atributos energéticos que compran los operadores; una evaluación debe reportar ambas con sus límites y método [23, 30].

Fuente o recurso	Aporte posible	Límite y pregunta de diseño
Electricidad de red	Suministro principal a escala, conectado a una mezcla de generación	¿Qué capacidad firme y fecha entrega la utility? ¿Qué congestión, obras y contingencias afectan la conexión?
Hidroelectricidad	Puede aportar energía gestionable con embalse; otras centrales dependen del caudal	¿Qué sequía, estacionalidad, derechos de agua y límites de transmisión se modelan?
Solar fotovoltaica	Generación local o contratada, modular y con perfil diurno	¿Cómo se cubren las horas sin sol, la variación estacional y la diferencia entre producción y carga?
Eólica terrestre o marina	Energía renovable con perfiles que pueden complementar otras fuentes	¿Qué producción horaria se espera, qué red la transporta y qué firmeza contractual la acompaña?
Geotermia	Puede aportar generación estable donde el recurso esté probado	¿Se confirmaron recurso, costo, riesgo geológico, permisos y capacidad de conexión?
Nuclear	Generación de bajas emisiones operacionales y alta disponibilidad potencial, según mercado	¿Existe una fuente operativa y una vía contractual y regulatoria real? No se presume acceso directo ni plazo de construcción.
Gas natural	Generación despachable de red o en sitio	¿Hay gasoducto o suministro firme? ¿Cuál es la exposición a precio, emisiones, permisos y fallas comunes?

Fuente o recurso	Aporte posible	Límite y pregunta de diseño
Combustibles líquidos derivados del petróleo	Diésel y, donde lo permitan la regulación y el diseño, otros combustibles líquidos para generadores de emergencia y pruebas	¿Cuántas horas de autonomía real existen y cómo se reabastece el sitio? ¿Qué emisiones, ruido, almacenamiento y permisos aplican?
BESS	Almacena energía y puede aportar respuesta rápida, gestión de demanda o servicios de red	¿Cuál es su potencia en MW, energía útil en MWh y duración? ¿Qué degradación, fuente de carga y protección contra incendio se consideran?
UPS	Acondiciona energía y cubre la transición frente a perturbaciones breves	¿Qué autonomía, bypass, mantenimiento y ruta A/B se garantizan? No equivale a almacenamiento de larga duración.

La fuente renovable no es un sustituto automático de capacidad firme. Solar y viento requieren una combinación diseñada con red, almacenamiento, generación gestionable, respuesta flexible o contratos de cobertura. El BESS almacena electricidad producida en otro momento: no crea energía. Un generador diésel puede ser crítico durante una emergencia, pero su autonomía depende del inventario, consumo real, pruebas, logística y reposición; no se debe presentar como suministro ilimitado.

La evaluación combina el perfil horario y estacional de la carga con MW de potencia, MWh de energía, capacidad de conexión, emisiones, agua, combustible, precio y calendario. Los contratos identifican punto y fecha de entrega, volumen, duración, indexación, restricciones de curtailment, garantías de origen, correspondencia temporal y geográfica, respaldo y responsabilidad ante incumplimiento. Las afirmaciones de energía limpia indican si se refieren a consumo físico, compra contractual o certificados, y durante qué período se emparejan.

Las metas renovables deben definir el respaldo para noches sin sol, sequías, cortes y demoras de conexión; evalúe sus efectos en capacidad firme, costo y emisiones.

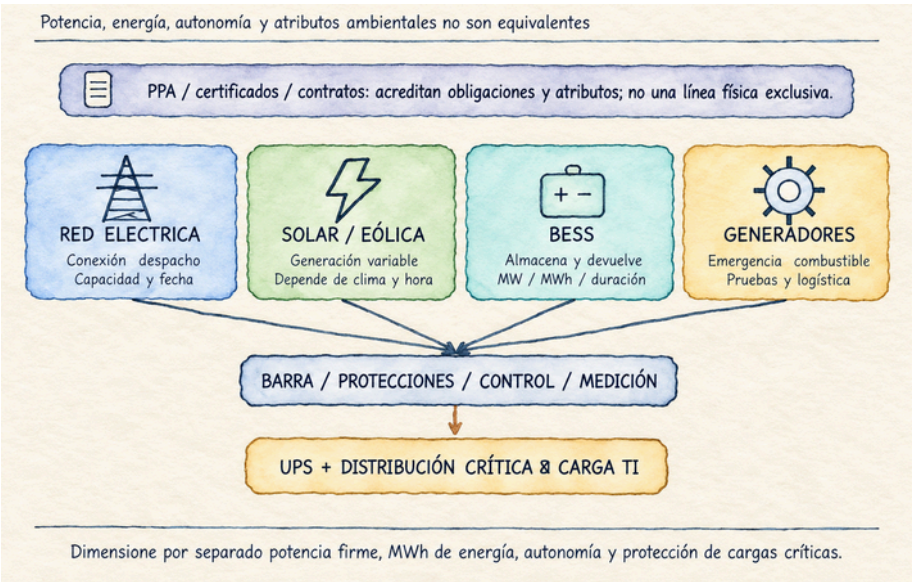


Figura 15. Fuentes y respaldo cumplen funciones distintas

Lectura. La red, la generación renovable, los contratos de compra, el BESS y los generadores no son sustitutos equivalentes. Solar y viento dependen de disponibilidad y perfil horario; un BESS desplaza energía y presta servicios según su reserva; la generación de emergencia requiere combustible, pruebas y logística. El estudio separa flujo físico, contrato, firmeza, emisiones y costo.

Suministro contratado y electricidad físicamente disponible

La electricidad entra a un centro por una red interconectada. El contrato puede comprar energía de una planta, energía y capacidad de un proveedor, o atributos ambientales; el flujo instantáneo en el sitio depende del despacho y del estado físico de la red. Un PPA físico puede establecer entrega a un nodo o sistema, mientras que un PPA financiero o virtual suele liquidar diferencias de precio y atributos sin tender un cable exclusivo entre generador y centro. Los instrumentos de energía renovable y las garantías de origen acreditan atributos conforme al mercado y a sus reglas; no

sustituyen un análisis horario de suministro ni una capacidad firme de conexión.

La diligencia contractual pregunta: quién vende y quién entrega; dónde ocurre la entrega; cuánto volumen y potencia están cubiertos; qué pasa con curtailment, congestión o desvíos; quién asume riesgo de precio y perfil; cómo se emparejan generación y consumo en tiempo y territorio; qué garantías o certificados se transfieren; y qué remedio existe ante incumplimiento. El reporte de sostenibilidad declara el método y no mezcla energía física, compras financieras y certificados en una sola cifra.

BESS: dimensionar y operar según su función

BESS es un sistema eléctrico con celdas, control de baterías, convertidor de potencia, transformadores según la arquitectura, protecciones, gestión térmica, detección y respuesta ante incendio, comunicaciones y lógica de despacho. MW mide la potencia que puede entregar o absorber; MWh, la energía almacenada. La duración nominal se aproxima con energía dividida por potencia, pero la energía útil se reduce por límites de estado de carga, reserva, eficiencia, degradación, temperatura y estrategia de operación.

Servicio	Qué aporta	Qué debe probar el dueño
Respuesta rápida y continuidad	Potencia inmediata para una transición o evento definido	Tiempo de respuesta, curva de potencia, autonomía útil y transición con UPS
Peak shaving	Reduce un máximo de importación en ventanas seleccionadas	Tarifa, ventana, SOC disponible, ciclos, degradación y carga de recarga
Gestión de demanda	Desplaza consumo eléctrico entre períodos	Pronóstico, límites de carga, costo de ciclo y reserva protegida

Servicio	Qué aporta	Qué debe probar el dueño
Integración renovable	Desplaza producción variable a otra hora	Perfil horario, pérdidas ida-vuelta, restricciones de red y atributo ambiental
Servicios al sistema eléctrico	Puede ofrecer flexibilidad según regulación y contrato	Elegibilidad, telemetría, disponibilidad, prioridad de continuidad y remuneración
Operación en isla	Ayuda a sostener cargas cuando se separa de la red pública	Esquema de protecciones, referencia de tensión/frecuencia, combustible y prueba integrada
Reinicio desde apagado	Puede contribuir al arranque de sistemas seleccionados	Capacidad black-start, secuencia, energía auxiliar y validación con fabricante

No todo BESS presta todos estos servicios a la vez. La estrategia de despacho especifica prioridad, estados de carga mínimos, bloqueos, límites de ciclos, modo degradado y autoridad para aceptar una instrucción externa. El valor económico por peak shaving, servicios de red o arbitraje se modela por separado del valor de continuidad. Un ingreso de mercado no puede contar con energía que debe reservarse para una contingencia.

Como ejemplo aritmético, un BESS de 40 MW y 160 MWh tiene una relación nominal de cuatro horas a potencia nominal. No se debe presentar esa cifra como autonomía garantizada: el resultado útil depende de potencia en los terminales, eficiencia, límites de descarga, estado inicial, temperatura y envejecimiento. El diseño indica energía garantizada al final de vida y condiciones ambientales, no solo capacidad de placa.

Una microred integra acometida, generación en sitio, almacenamiento, UPS, distribución y controles. Puede operar conectada a la red o en isla si la arquitectura y la regulación lo permiten. Los controles económicos y de resiliencia se subordinan

a prioridades aprobadas: seguridad de personas, estabilidad de la carga crítica, protección del equipo y disponibilidad. La configuración de 800 VDC y otras arquitecturas LVDC forman parte de trabajo de estandarización y diseños emergentes para cargas de alta densidad; deben tratarse como opciones sujetas a madurez, compatibilidad, protección y aprobación del proyecto, no como reemplazo universal de la distribución AC [32].

Topología, seguridad y pruebas

Las distribuciones A/B se siguen desde la fuente hasta la carga. Se identifican barras, protecciones, alimentaciones cruzadas, controles compartidos, bypass, transferencia y equipos de un solo cable. Una arquitectura dibujada como redundante no protege un equipo que depende de una sola PDU. Las maniobras se revisan con diagramas vigentes y procedimientos autorizados por personal competente.

El commissioning eléctrico incluye inspección, pruebas de fábrica y sitio cuando apliquen, verificación de protecciones, pruebas funcionales, transferencia, operación en isla, alarmas, carga, escenarios de mantenimiento y restauración. Para un BESS se añaden pruebas de carga y descarga, límites de estado de carga, respuesta del convertidor, alarmas, enclavamientos, operación segura y coordinación con la estrategia de UPS y generadores. La aceptación no debe exponer cargas críticas a un modo de prueba no autorizado. Los registros incluyen instrumentos, valores, configuración, responsables, excepciones y criterios de cierre [15, 17, 32].

Campus Horizonte | La frontera eléctrica de cada bloque

Expediente hipotético H-05. Si cada bloque debe entregar 100 MW IT y el PUE de diseño supuesto fuera 1,30 en una condición definida, la potencia total de sitio en esa condición sería aproximadamente 130 MW por bloque y 650 MW para cinco bloques simultáneos. Si se utiliza además un factor de potencia 0,95

a la frontera elegida, 650 MW corresponden aproximadamente a 684,2 MVA, antes de pérdidas aguas arriba, márgenes y condiciones de contingencia. No significa que exista una asignación real de 684,2 MVA.

La puerta de energía requiere estudios, punto de conexión, obras, costos, fecha vinculante y pruebas de la potencia que sobrevive al evento de diseño. El caso no asigna «energía firme» a ningún bloque hasta incorporar esa evidencia.

Preguntas de aplicación

1. ¿Cuántos MW estarán disponibles en cada frontera y fecha, y qué prueba confirma que la cadena eléctrica sostiene la carga prevista bajo contingencia?
2. ¿Qué modo de falla reduce la potencia IT que llega al cliente?
3. ¿Qué estudio de conexión, diagrama y prueba respaldan cada MW y su fecha?

Práctica de dominio

Trace la ruta eléctrica de red a rack; separe MW de campus, MW IT y respaldo, y pruebe la carga sobreviviente.

13. Refrigeración, control térmico y alta densidad

Objetivo del capítulo: relacionar densidad de rack, carga térmica, estrategia de refrigeración, agua y modos degradados.

Diseñar para extraer el calor de la carga real

La mayor parte de la energía consumida por IT termina como calor dentro del centro de datos. La capacidad de refrigeración se determina con carga presente y prevista por zona y rack, condiciones exteriores, pérdidas de los equipos, variabilidad de la carga, distribución de aire o líquido y estrategia de contingencia. El promedio de la sala no revela los puntos calientes ni los saltos de demanda de un rack de IA.

Los límites de operación se verifican en las entradas de aire al equipo y en los circuitos térmicos que usan líquido. Temperatura, humedad, punto de rocío y ubicación del sensor deben corresponder a la guía del fabricante y al marco térmico aplicable. Un sensor único en el retorno no informa qué condición enfrentan todos los servidores [18].

Aire, contención y eficiencia de distribución

Los racks suelen organizarse para orientar entradas frías y salidas calientes. La contención separa corrientes y reduce la recirculación si el sellado, caudal, paneles ciegos y retorno están coordinados. Se revisan cables y penetraciones que bloqueen el flujo, espacios vacíos, puertas, recirculación, presión, cortocircuitos de aire y respuesta cuando una unidad queda fuera de servicio.

Enfoque	Transferencia térmica	Consideración de diseño
CRAC de expansión directa	Refrigerante entre unidad y aire	Aplicación, redundancia y mantenimiento de equipos locales

Enfoque	Transferencia térmica	Consideración de diseño
CRAH con agua helada	Aire intercambia calor con serpentín y circuito de agua	Dependencia de planta, bombas, válvulas y distribución hidráulica
Unidad in-row o puerta trasera	Acerca el intercambio a una fila o rack	Carga por rack, conexión, espacio y gestión de agua/refrigerante
Direct-to-chip	Líquido recoge calor en placas de los componentes	CDU, caudal, presión, calidad del fluido, mangueras y compatibilidad
Inmersión	El equipo transfiere calor a un fluido dieléctrico	Diseño del tanque, manejo de equipos, fluido y procedimientos especializados

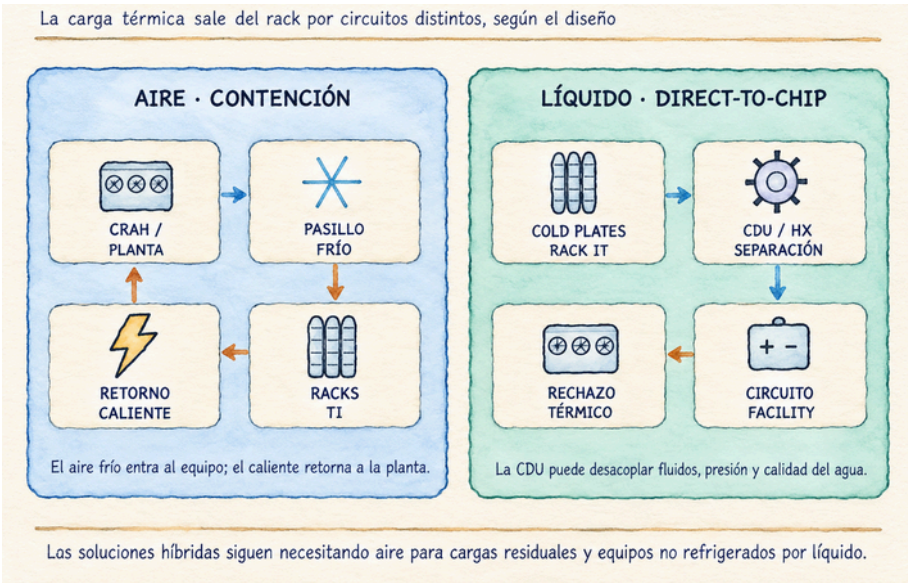


Figura 16. Circuitos de refrigeración por aire y líquido

Lectura. No existe una arquitectura universal. El aire continúa siendo parte del diseño incluso con refrigeración líquida, porque memoria, fuentes, red y otros componentes también generan carga térmica. La selección considera densidad, compatibilidad de servidores, eficiencia, consumo de agua, facilidad de reparación, madurez de la operación y costo de ciclo de vida [30, 31, 32].

Convertir densidad térmica en capacidad entregable

La capacidad de una sala se declara por zonas y perfiles de rack, no solo como toneladas de refrigeración del edificio. El cálculo parte de la carga IT presente y prevista, la distribución desigual entre racks, las condiciones exteriores, la temperatura de entrada aceptada por los fabricantes, el caudal disponible, las pérdidas, los márgenes y el modo que queda tras una falla. Un promedio de kW por rack puede ocultar una fila de aceleradores que supera el límite térmico local.

En refrigeración líquida, el diseño cubre el circuito completo desde la tecnología IT hasta el rechazo de calor: componentes y placas frías, conexiones, distribución del rack, CDU, bombas, intercambiadores, circuito del edificio y equipos exteriores. Se definen fluido, calidad del agua, presión, temperatura de suministro y retorno, caudal, compatibilidad, detección de fugas y responsabilidades cuando un servidor se retira o cambia. La refrigeración líquida captura calor cerca de la fuente; no elimina la carga térmica de memoria, fuentes, almacenamiento, switches ni de la sala.

El cliente debe conocer el sobre de operación que realmente se soporta: potencia por rack, fracción de calor capturada por líquido, condiciones de aire restantes, simultaneidad, tolerancia a pérdida de unidades, disponibilidad de agua, margen de expansión y procedimientos de mantenimiento. Cada valor se convierte en criterio de aceptación y se prueba durante el commissioning con una configuración representativa [30].

Energía, agua y resiliencia térmica

El enfriamiento intercambia consumo eléctrico, agua, condiciones ambientales, capacidad y facilidad de operación. Las torres evaporativas pueden reducir ciertas cargas eléctricas, pero consumen agua; los dry coolers evitan evaporación directa, aunque su desempeño depende del clima y puede requerir más superficie o

energía. El balance se realiza para las horas críticas y el año completo, no para un día climático promedio. PUE debe acompañarse de indicadores de agua, emisiones y carga útil, con fronteras de medición explícitas [20, 29].

La estrategia hídrica identifica fuente, derechos, calidad, tratamiento, consumo máximo, descarga, restricciones de sequía y competencia con otros usuarios. WUE ayuda a normalizar consumo respecto de energía IT, pero no describe por sí sola el estrés hídrico de una cuenca; también importan la ubicación y el origen del recurso. Un buen promedio anual puede ocultar un riesgo alto si el suministro falla en la temporada crítica.

La resiliencia térmica se comprueba en plantas, bombas, circuitos, válvulas, CDU, controles, sensores, energía de respaldo y procedimientos. Se modela la pérdida de un componente, una sala o una fuente de agua, y se verifica qué densidad puede sostenerse durante la restauración. Las pruebas integradas observan temperatura en entradas de equipos, presión y caudal, alarmas, transferencia eléctrica, respuesta de controles, carga de IT y recuperación. Contar unidades redundantes no demuestra que el sistema conserve capacidad cuando una unidad está fuera de servicio.

En instalaciones para IA, energía y enfriamiento se diseñan como una sola capacidad contratada. Un campus puede disponer de MW eléctricos y aun así no aceptar una nueva fase de GPUs si no tiene capacidad térmica, agua, CDU, distribución de líquido, espacio o personal para operarla. Inversión, energización, enfriamiento y aceptación de racks deben compartir hitos de entrega.

Agua, fluidos y resiliencia

Los circuitos y plantas se revisan con criterios de calidad del fluido, filtración, corrosión, tratamiento, detección de fugas, drenaje, aislamiento de tramos y acceso seguro. Los sensores de fuga se ubican en puntos de exposición definidos por el recorrido de

tuberías y equipos; las alarmas deben producir acciones, no solo registros. La reutilización de calor y el uso de agua dependen del clima, del consumidor térmico cercano, del permiso y de la economía local.

Una pérdida de unidad, bomba, circuito, enfriador, control o alimentación puede reducir la capacidad disponible. La secuencia de control debe mantener condiciones seguras, detectar carga fuera de rango y evitar que una corrección automática empeore el evento. Se prueban arranque, transferencia de carga, alarmas, pérdida de sensor, operación degradada y recuperación.

Arquitecturas de refrigeración líquida: seguir el calor hasta su rechazo

La refrigeración líquida es una familia de arquitecturas, no un producto único. La selección debe comenzar con la cantidad de calor que se recoge en cada componente, su destino, la condición que acepta el fabricante y la facilidad de aislar y mantener cada tramo. Puede coexistir más de un método dentro de un mismo edificio: aire para cargas tradicionales y componentes residuales; intercambiadores de puerta para filas densas; direct-to-chip para procesadores y aceleradores; inmersión para plataformas específicamente compatibles.

Solución	Dónde recoge el calor	Interfaces y límites que se deben coordinar
Aire con contención	En el flujo de aire del servidor y la sala	Caudal, recirculación, retorno, punto de entrada y capacidad bajo pérdida de una unidad
Intercambiador de puerta trasera	En el aire caliente que sale del rack	Peso y mantenimiento de puertas, caudal de agua, conexión flexible y calor residual en sala

Solución	Dónde recoge el calor	Interfaces y límites que se deben coordinar
Direct-to-chip de una fase	En placas frías de componentes seleccionados; el fluido permanece líquido	Fluido, caudal, presión diferencial, distribución del rack, quick disconnects y CDU
Direct-to-chip de dos fases	En componentes donde el fluido cambia de fase	Refrigerante, presión, compatibilidad, contención, control y prácticas específicas de servicio
Inmersión	En el fluido dieléctrico que rodea equipos compatibles	Tanque, fluido, materiales, manipulación, compatibilidad del hardware y logística de mantenimiento

En direct-to-chip, el camino térmico suele ir desde la placa fría hasta el circuito de tecnología de la instalación (Technology Cooling System, TCS), pasa por una CDU y se intercambia con el circuito de facility que finalmente rechaza calor en dry coolers, chillers, torres u otra planta definida. La CDU puede separar la calidad y presión de los circuitos, ajustar temperaturas, filtrar, medir caudal y gobernar bombas. Su ubicación —en rack, fila o planta— afecta capacidad, mantenimiento, distribución y cantidad de dependencias compartidas.

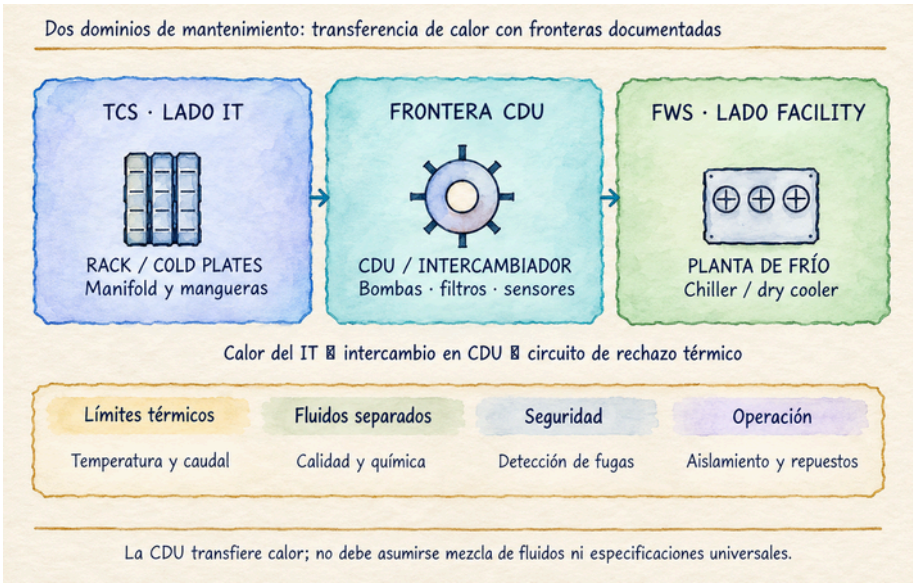


Figura 17. Interfaz térmica entre IT, CDU y facility

Lectura. El plano de interfaz fija quién entrega tuberías, válvulas, manifolds, mangueras, conectores, sensores, alimentación, control y fluidos; dónde termina la garantía de IT y empieza la del facility; qué requisitos de limpieza, presión y química deben cumplirse; y cómo se retira una unidad de cómputo sin derramar fluido ni contaminar el circuito. Las tolerancias exactas pertenecen al fabricante y a la ingeniería de detalle. No existe una presión, temperatura o química universal que se pueda aplicar a todos los equipos.

Envolvente térmica, densidad y capacidad comercializable

Cada zona de alta densidad requiere una envolvente de operación aprobada por facility e IT: potencia y perfil de rack, fracción de calor capturada por líquido, calor residual en sala, temperatura de suministro y retorno, caudal, presión diferencial, calidad del fluido, margen de control, densidad por fila, sensores, alarmas y mantenimiento permitido. Se documenta tanto la condición nominal como la degradada y la de recuperación. La etiqueta “AI-ready” carece de valor técnico si no viene acompañada por estos límites y pruebas.

El balance térmico se coordina por bloque y fase. El calor puede distribuirse de forma desigual: una zona de entrenamiento con racks densos no se compensa con capacidad sobrante en una sala

de menor densidad si los circuitos no pueden transferirla. El plan de expansión identifica límites en CDU, bombas, tuberías, intercambiadores, unidades de rechazo, alimentación y controles. El modelado prueba las horas climáticas de diseño y no supone que el mismo rendimiento exista todo el año.

La temperatura de agua más alta puede aumentar las horas de free cooling y habilitar recuperación térmica, pero debe ser compatible con la carga y el ambiente. El calor líquido puede tener una temperatura más aprovechable que el calor diluido en aire; su reutilización exige un cliente térmico próximo, intercambiador, red, demanda coincidente y una economía que justifique la infraestructura. Si no hay uso real del calor, se reporta como potencial y no como beneficio obtenido.

Dominios de falla: agua y aceptación térmica

Un circuito dibujado como dos ramas puede conservar una dependencia común en el control, la alimentación de bombas, un intercambiador, una tubería principal, una válvula o la fuente de agua. La revisión marca estos puntos en un árbol de fallas y calcula qué carga sigue operativa tras cada pérdida. La respuesta puede ser limitar carga, migrar trabajos, operar con temperatura distinta o desconectar una zona; cada acción requiere un responsable y un umbral.

Prueba térmica	Qué observar	Registro de salida
Limpieza y puesta en condición	Partículas, filtración y estado de circuito según especificación	Método, muestras, filtros y autorización de llenado
Prueba de estanqueidad	Unión, tramo aislado y condición de prueba indicada por fabricante	Instrumento, presión/tiempo aprobados, resultado y reparación
Caudal y diferencial de presión	Rendimiento por ramal y condición de carga representativa	Caudal, presión, temperatura, sensor y ubicación

Prueba térmica	Qué observar	Registro de salida
Secuencia de CDU	Bombas, control, intercambio, alarmas y pérdida de unidad	Curvas de tendencia, alarmas y capacidad remanente
Fuga o sensor defectuoso	Detección, localización, aislamiento y escalamiento	Cronología, zona aislada y efecto en IT
Pérdida de alimentación o control	Continuidad de bombeo y reacción segura	Estado eléctrico, respuesta de válvulas y carga sostenida
Recuperación	Normalización sin oscilación ni repetición del evento	Tendencias, tiempo, causa y autorización de vuelta

El plan se ejecuta con agua o fluido aprobado, condiciones de seguridad y sistemas sin exposición innecesaria. El commissioning integrado debe observar el mismo reloj para bombas, válvulas, alarmas de fugas, alimentación y telemetría de IT. El equipo de operación recibe diagramas, puntos de aislamiento, repuestos, entrenamiento, límites de presión y temperatura, procedimientos de drenaje y reposición, y criterios para suspender carga.

Agua, clima y ciclo de vida: diseñar con el territorio completo

El balance de agua no se resume en un indicador anual. Debe identificar fuente, volumen extraído, volumen consumido, descarga, calidad, estación, permiso, competencia con otros usos y condiciones de sequía. El consumo asociado a refrigeración puede variar por estación, carga, arquitectura y modo de operación; una cifra de diseño no describe necesariamente el año extremo ni la condición de máxima ocupación. En zonas con restricciones hídricas, el proyecto debe probar escenarios en que la fuente disminuye o cambia de calidad y decidir qué carga puede mantenerse.

El análisis climático superpone peligros del sitio con equipos, accesos y rutas: calor extremo y olas de calor, incendio forestal y humo, inundación fluvial o costera, sequía, tormenta, viento, sismo, deslizamiento y pérdida prolongada de servicios. Para cada peligro se mide exposición, vulnerabilidad, duración probable, dependencia exterior, respuesta y tiempo de recuperación. Una ruta de fibra dentro de una misma zona de incendio o una subestación en una cota inundable pueden compartir un riesgo que no se resuelve con dos contratos.

Dimensión	Qué debe medirse o comprobarse	Decisión que informa
Agua	Extracción, consumo, descarga, fuente, calidad, permiso y variación estacional	Tecnología de rechazo de calor y modo de operación bajo restricción
Calor	Temperatura de diseño, horas extremas, humedad y derating de equipos	Margen térmico, selección y capacidad disponible en verano
Incendio	Historial y mapa de peligro, humo, acceso, combustible y cortes preventivos	Protección, filtración, autonomía y respuesta territorial
Inundación	Cotas, drenaje, cuencas, marejada, bombas y energía de respaldo	Emplazamiento de equipos, barreras y continuidad del acceso
Sequía	Probabilidad de restricción, prioridades de uso y alternativas de suministro	Volumen firme, almacenamiento y límites de carga
Materiales y refrigerantes	Tipo, inventario, fugas, disponibilidad, seguridad y regulación local	Riesgo operacional, mantenimiento y sustitución

Dimensión	Qué debe medirse o comprobarse	Decisión que informa
Fin de vida	Servidores, baterías, UPS, refrigerantes, cable, embalajes y metales	Reutilización, reciclaje, proveedor autorizado y trazabilidad

El ciclo de vida comienza en el diseño de compras. La organización registra vida útil esperada, reparabilidad, soporte de firmware, repuestos, sustancias reguladas, política de baterías, embalajes y destino al retirar equipos. La disposición debe proteger datos: borrado o destrucción verificable de medios, cadena de custodia, inventario serializado y certificados del gestor. La reutilización puede extender valor si existe una evaluación de seguridad y desempeño; el reciclaje debe identificar a quién se transfiere el material y cómo se documenta su tratamiento.

El Global E-waste Monitor 2024 estimó 62 millones de toneladas de residuos electrónicos generados en 2022 y documentó que el 22,3 % fue recogido y reciclado formalmente; estas cifras globales contextualizan el reto y no cuantifican la huella de un campus en particular [51]. El Banco Mundial y la UIT recomiendan considerar el clima, la energía, el agua, refrigerantes y la gestión de residuos en el desarrollo y operación de centros de datos [46].

La selección entre enfriamiento evaporativo, circuitos cerrados, rechazo seco, enfriamiento líquido u otras soluciones exige un balance de agua, energía, temperatura, densidad, ruido, espacio y contingencia. No hay una tecnología universalmente superior: el clima, la calidad del agua, la tarifa eléctrica, la disponibilidad de repuestos, la carga IT y la capacidad del equipo local cambian el resultado. La alternativa debe declarar en qué condiciones baja el rendimiento, qué límites activa y cómo se comunica una restricción al cliente.

Campus Horizonte | El MW eléctrico también exige MW térmicos

Expediente hipotético H-06. Para una carga de 100 MW IT, gran parte de esa potencia se transforma en calor que debe retirarse del área de TI. Como hipótesis para ensayar interfaces, el 80 % del calor de IT podría capturarse por circuito líquido y el 20 % restante por sistemas de aire; la distribución real depende de la plataforma y no equivale al calor total que debe rechazar la planta.

Antes de llamar vendible a un bloque deben acreditarse temperaturas de entrada, caudal, presión, calidad del fluido, respuesta ante falla de CDU o bombas, consumo hídrico y capacidad bajo clima extremo. La ausencia de agua o de capacidad térmica puede mantener 100 MW eléctricos fuera de la categoría de MW IT utilizables.

Preguntas de aplicación

1. ¿Puede la arquitectura térmica disipar la carga real en el clima y escenario de falla definidos sin exceder límites de energía, agua o operación?
2. ¿Qué escenario de calor o restricción de agua agota primero el margen térmico?
3. ¿Qué balance térmico, fuente de agua y criterio de aceptación verifican la solución?

Práctica de dominio

Para una zona hipotética de alta densidad, enumere el camino del calor, controles, sensores, recurso hídrico y respuesta ante pérdida de un componente.

Decisión de diseño. Diseñe el circuito térmico según la densidad real del IT y verifique condiciones en los puntos de entrada al equipo. Integre aire, líquido, potencia, detección de fugas y mantenimiento en una misma secuencia de prueba.

14. Protección, monitoreo y operación del facility

Objetivo del capítulo: organizar protección, instrumentación, alarmas y responsabilidades operacionales del facility.

Seguridad por capas y protección de vida

La seguridad física define perímetros, zonas de acceso, identificación, autorización, acompañamiento, registro de visitas y revisión de eventos. Cámaras, lectores, esclusas, guardias y cerraduras cumplen funciones distintas y deben responder a una política clara. El control de acceso facilita tanto la protección de activos como la investigación de cambios o incidentes; las rutas de evacuación y la respuesta de emergencia conservan prioridad.

La detección de incendio, la lógica de alarma, la supresión y la respuesta se diseñan como un sistema coordinado con la normativa adoptada por la autoridad competente. La detección temprana puede combinar tecnologías según el ambiente; la selección de agentes y las secuencias de alarma, descarga, ventilación, puertas y alimentación deben ser validadas por especialistas y probadas antes de aceptar la instalación. Detectar un incendio no equivale a controlar sus efectos sobre personas, IT y continuidad [19].

La protección también considera agua y electricidad. Se evalúan filtraciones desde tuberías, condensación, drenajes, ingreso de agua exterior y exposición de equipos. La puesta a tierra, la unión equipotencial, la protección contra sobretensiones y la coordinación de dispositivos se verifican según el diseño eléctrico y el código local. Estos sistemas reducen riesgos y deben mantenerse con planos, mediciones y registros actualizados.

BMS, EPMS y DCIM

Los nombres comerciales varían y pueden solaparse. Conviene describir cada función por su alcance, fuentes de datos, autoridad de control e interfaz.

Sistema	Vista dominante	Ejemplos de datos
BMS	Edificio y sistemas mecánicos	HVAC, bombas, temperaturas, humedad, accesos y alarmas de edificio
EPMS	Distribución y calidad eléctrica	Tensión, corriente, potencia, energía, estado de breaker y eventos eléctricos
DCIM	Activos, espacio y capacidad del centro de datos	Racks, equipos, conectividad, capacidad térmica/eléctrica y relaciones de activos

Una integración útil requiere identificadores comunes, unidades, marcas de tiempo sincronizadas, calidad de datos, propiedad, permisos y reglas de escalamiento. Las funciones de monitoreo no deben habilitar escrituras o maniobras sin controles, segregación de roles, registros y procedimientos. BMS, EPMS y DCIM también forman parte del entorno OT; su acceso remoto, respaldo y gestión de cambios deben diseñarse con criterios de ciberseguridad y operación segura [15, 22].

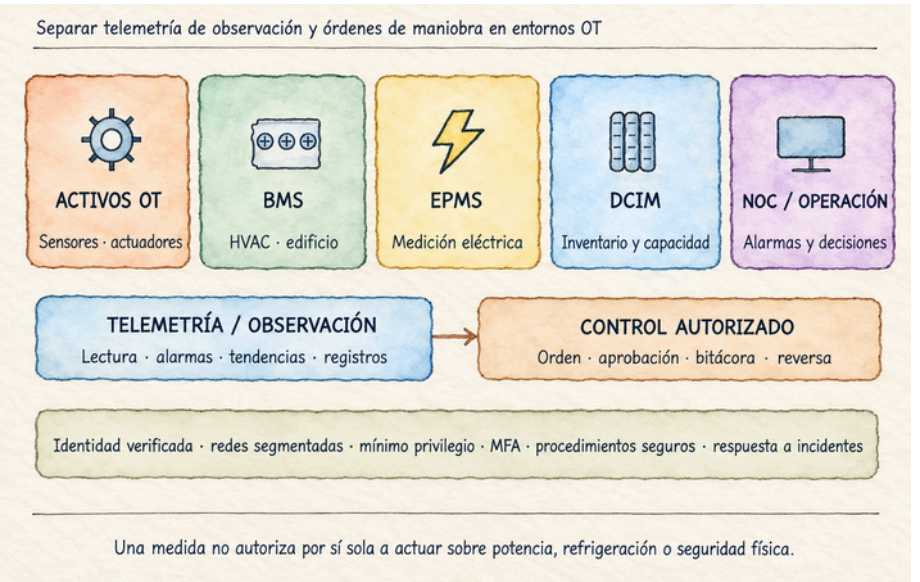


Figura 18. Supervisión, medición y control con autoridad definida

Lectura. BMS, EPMS y DCIM reúnen señales de dominios diferentes; su valor depende de datos con unidad, tiempo, calidad y responsable. La telemetría hacia operaciones y la orden de control son caminos distintos. Toda maniobra requiere autorización, segmentación, registro, procedimiento y reversa; los sistemas del facility también necesitan protección OT.

Instrumentación, alarmas y eficiencia

Cada punto de medición debe tener variable, ubicación, rango, exactitud, frecuencia, calibración, responsable y acción cuando sale de banda. Las alarmas se priorizan por consecuencia y tiempo disponible para responder. Una matriz causa-efecto identifica condición, confirmación, respuesta automática permitida, alerta, escalamiento, resultado esperado y prueba de restauración.

PUE = energía total del centro de datos ÷ energía de los equipos IT, durante un mismo período y con fronteras de medición explícitas. Es un indicador útil de eficiencia de infraestructura, pero no mide por sí solo productividad de la carga, disponibilidad, latencia, emisiones, calidad del agua o costo por servicio. Un centro puede mejorar PUE porque aumenta la utilización IT sin cambiar los equipos de soporte; la interpretación debe considerar clima, fase,

carga, generación local y método de medición. ISO/IEC 30134-2:2026 define la revisión vigente del KPI PUE y precisa condiciones de medición, incluidos edificios de uso mixto [20].

El tablero operacional combina capacidad libre, demanda prevista, consumo, estado de respaldo, margen térmico, alarmas, mantenimiento pendiente, fallas de conectividad, desviaciones de SLA y evidencias vencidas. Las tendencias permiten identificar crecimiento de carga, desequilibrios y riesgo antes de que la capacidad nominal se agote.

Procedimientos y aprendizaje

SOP describe una operación repetible; MOP establece pasos, riesgos, criterios de pausa y reversa para un cambio planificado; EOP organiza acciones frente a una condición anormal o emergencia. Los documentos deben ser ejecutables por el equipo que los usa, reflejar el diseño instalado y quedar practicados. Un cambio requiere verificar impacto cruzado: energía, refrigeración, seguridad, red, capacidad, clientes y rutas alternativas.

El modelo operativo asigna responsables de alarmas, permisos, accesos, pruebas, comunicaciones, escalamiento, recuperación y cierre de causa raíz. El inventario de activos, planos as-built, secuencias de control, matriz de alarmas, resultados de pruebas, repuestos y procedimientos forman una memoria viva del facility. La operación de conectividad se profundiza en el capítulo 25; el commissioning multidisciplinario, en el capítulo 24 [21, 22].

Seguridad convergente: ciberseguridad, protección física y OT

La ciberseguridad del centro de datos también protege sistemas que miden o controlan instalaciones. BMS, EPMS, DCIM, control de refrigeración, UPS, generadores, baterías, detección de incendios, control de acceso y monitoreo ambiental pueden estar conectados a redes IT, a portales de fabricantes o a servicios remotos. Un incidente digital puede alterar visibilidad o control físico; una

intrusión, corte de energía o daño a una ruta puede inutilizar herramientas digitales y accesos.

El modelo de amenaza incluye cuentas privilegiadas, acceso remoto de proveedores, credenciales compartidas, firmware, medios extraíbles, dependencias de identidad, equipos de soporte, técnicos y contratistas, pérdida de conectividad y cambios urgentes durante un incidente. El objetivo no es tratar cada componente como una amenaza idéntica: es mapear qué función controla, cuál es el efecto de una orden errónea, qué ocurre si se pierde su supervisión y cómo se conserva una operación segura.

Superficie	Riesgo de interfaz	Control que debe definirse y probarse
Red de control y OT	Acceso remoto o lateral desde redes corporativas y terceros	Segmentación, autorización, registro, alcance de sesión y plan de operación degradada
Subestación y distribución	Cambios o telemetría que afectan protección y maniobra	Roles separados, gestión de cambios, respaldo de configuración y coordinación con especialistas
Refrigeración y agua	Setpoints, sensores o válvulas alterados	Alarmas independientes, límites seguros, prueba de recuperación y modo manual autorizado
Seguridad física	Credenciales, puertas, CCTV y procedimientos dependen de servicios digitales	Acceso de emergencia, doble control donde aplique, registro alternativo y simulacro
Carrier, fibra y terreno	Corte, daño intencional, obra de terceros o exposición de planos	Protección de información, vigilancia, notificación, rutas alternas y respuesta conjunta
Proveedor y cadena de suministro	Firmware, repuestos, soporte o dependencia de una sola empresa	Inventario, validación, gestión de vulnerabilidades, sustitución y condiciones de salida

NIST SP 800-82 Rev. 3 orienta la seguridad de tecnología operacional considerando disponibilidad, rendimiento, seguridad de las personas y confiabilidad; su alcance incluye automatización de edificios y monitoreo de entornos físicos [48]. Al cierre editorial de octubre de 2026, NIST mantenía Rev. 3 como edición final y había publicado el borrador público inicial de Rev. 4 para comentarios hasta el 30 de noviembre de 2026; debe verificarse el estado antes de imprimir [48]. NIST CSF 2.0 puede organizar responsabilidades y objetivos a nivel de dirección y operación [47]. La aplicación de guías y regulación local debe revisarse para cada proyecto.

El diseño concreta principios en procedimientos aplicables: acceso mínimo necesario; identificación individual; autenticación reforzada según el riesgo; segmentación; inventario de activos; sincronización de tiempo; registros protegidos; copias de configuraciones y evidencia de restauración; acceso remoto aprobado y supervisado; y revisión periódica de cuentas de terceros. Cada control debe equilibrarse con seguridad operacional: no se bloquea automáticamente una acción de emergencia si puede crear riesgo físico mayor. Las maniobras peligrosas requieren autoridad, coordinación y personal calificado según el sitio.

La respuesta reúne SOC, NOC, facility control, seguridad física, carrier, ciberseguridad, legal, comunicaciones y dirección. Un playbook identifica quién determina impacto físico, quién aísla un segmento, quién preserva evidencia, quién autoriza un cambio, cómo se informa al cliente y qué autoridad externa se notifica si corresponde. Los equipos practican tanto pérdida de herramientas digitales como fallas físicas; un procedimiento que requiere un sistema de identidad inaccesible durante la contingencia no está listo.

Campus Horizonte | Seguridad como condición de entrega

Expediente hipotético H-07. La aceptación del primer bloque requiere una matriz causa-efecto que coordine detección y

supresión de incendios, evacuación, control de accesos, ciberseguridad OT, respuesta de operación y notificación a clientes. El comité no confunde la compra de cámaras, sensores o paneles con la prueba integrada de que la secuencia funciona.

Cada prueba define criterio de éxito, autoridad técnica, registros, límites de riesgo y procedimiento de restauración. Ningún ejercicio supone maniobras peligrosas sobre cargas reales sin permiso y plan de seguridad.

Preguntas de aplicación

1. ¿Qué alarmas, controles y barreras permiten detectar y contener un incidente sin poner en riesgo a las personas ni afectar cargas ajenas?
2. ¿Qué acceso, control o procedimiento podría facilitar un incidente físico o digital?
3. ¿Qué registros de acceso, alarmas y simulacros demuestran que las barreras funcionan?

Práctica de dominio

Construya una matriz causa-efecto para tres alarmas críticas, desde la señal detectada hasta la respuesta y evidencia de cierre.

Decisión de diseño. Conecte cada alarma con una persona, una respuesta aprobada y un criterio de cierre. Mantenga BMS, EPMS, DCIM, seguridad, protección contra incendio y telecomunicaciones coordinados en los planos, las pruebas y los procedimientos.

Matriz de diligencia técnica

Esta matriz convierte los capítulos 12–14 en preguntas de inversión. El inversionista solicita bases de diseño, documentos vigentes, pruebas presenciables y responsables; no reemplaza a los especialistas ni fija valores universales. En Chile, la revisión debe mapear los pliegos SEC/RIC aplicables y la normativa local; NFPA 70E puede servir como referencia para seguridad del trabajo eléctrico, no como sustituto de la regulación del sitio [73, 74]. ASHRAE TC 9.9 y el marco para centros de datos de IA orientan el desempeño energético, el entorno térmico y la coordinación con refrigeración. NFPA 75 ofrece una referencia específica de protección contra incendio para equipos de TI [18, 19, 31].

Sistema	Evidencia que debe pedir el inversionista	Alerta que exige resolver
Potencia y conexión	Perfil horario y por fase; estudio y acuerdo de conexión; punto de entrega, MW/MVA, obras, costo y fecha; unifilar hasta la carga IT; frontera de medición y capacidad disponible.	MW anunciados sin fecha contractual ni estudio; MW del sitio confundidos con MW IT; obras futuras sin responsable, costo ni cronograma.
Continuidad y seguridad eléctrica	Estudios de cortocircuito, coordinación de protecciones, calidad de energía y puesta a tierra; operación de UPS, baterías, generadores y BESS; autonomía bajo carga; mantenimiento, permisos de trabajo y controles para riesgo de arco [17, 73, 74].	Rutas A/B con causa común; respaldo probado solo en vacío; mantenimiento que exige un bypass no aprobado; trabajo energizado sin evaluación, autorización y procedimiento seguro.

Sistema	Evidencia que debe pedir el inversionista	Alerta que exige resolver
Climatización y densidad	Perfil térmico por rack, límites del fabricante y condición climática de diseño; balance de aire o líquido, temperaturas, caudal, presión, humedad/punto de rocío, calidad de agua, detección y aislamiento de fugas; PUE/WUE con fronteras explícitas [18, 31].	Capacidad expresada solo en toneladas o temperatura promedio; densidad pico, agua, compatibilidad de circuitos o respuesta ante fugas sin demostrar.
Resiliencia térmica	Capacidad en calor extremo, mantenimiento y falla de un componente; respuesta de bombas, CDU, controles y rechazo de calor; pruebas con carga representativa, alarmas, transferencia, recuperación y operación degradada [18, 31].	Garantía solo en condición nominal; prueba sin carga representativa; capacidad sobreviviente o tiempos de recuperación no declarados.
Incendio, vida y seguridad física	Estrategia de protección aprobada localmente; detección, alarma, supresión, evacuación y matriz causa–efecto; riesgos de baterías, generadores y combustible; pruebas integradas. Revisar perímetro, zonas, visitas, contratistas, CCTV y respuesta [19].	Certificados de equipos sin prueba del sistema; evacuación o secuencia de alarma sin verificar; accesos de terceros no trazables; un fallo digital bloquea una respuesta de emergencia.

Sistema	Evidencia que debe pedir el inversionista	Alerta que exige resolver
Ciberseguridad OT y aceptación	Inventario BMS/EPMS/DCIM y controles; zonas de red, identidad, privilegios y acceso remoto de proveedores; logs, respaldo/restauración y respuesta a incidentes; commissioning integrado de energía, clima, incendio y controles, con acta, testigos y pendientes con dueño/fecha [48, 72].	Cuentas compartidas o acceso remoto sin supervisión; configuraciones sin restauración probada; aceptación basada en informe de proveedor o sin cerrar fallas críticas.

Regla de decisión. Una capacidad solo se trata como disponible cuando su frontera, condición operativa, prueba, responsable y fecha de aceptación están documentados. Una brecha crítica sin dueño o sin prueba mantiene la puerta condicionada.

Parte III · Diseñar el servicio digital

15. El centro de datos es un nodo de una ruta

Objetivo del capítulo: traducir una aplicación y sus contratos en requisitos de conectividad de extremo a extremo.

La unidad de diseño es el servicio

En esta parte la pregunta cambia: después de evaluar edificio, potencia y enfriamiento, corresponde comprobar la ruta completa del servicio digital. Un campus participa en una red física y comercial que conecta usuarios, empresas, nubes, plataformas de intercambio y otros centros de datos. La utilidad del activo depende de que el servicio entre, se procese y salga por caminos y contratos adecuados.

Por eso conviene cambiar la unidad de análisis. En vez de comenzar por el edificio o por el contrato de un carrier, se comienza por el servicio que se quiere entregar. ¿Quién lo usa? ¿Desde dónde? ¿Qué destinos debe alcanzar? ¿Qué pérdida de conectividad puede tolerar? ¿Cuánto tarda una interrupción en convertirse en daño operacional? ¿Qué carga debe seguir pasando si se pierde una ruta completa?

La conectividad se despliega en dominios distintos. El recorrido puede atravesar la red del cliente, la fabric interna, el cableado estructurado del centro de datos, un cross-connect, la MMR, la sala de entrada, el campus, la red metropolitana, un backbone nacional, una estación de amarre submarino y una red de destino. La aplicación observa el resultado de todos ellos, aunque cada tramo tenga propietario, tecnología y contrato diferentes.



Figura 19. El recorrido que debe quedar bajo diseño y observación

El diagrama es una simplificación, pero obliga a una conversación útil: ¿quién responde por cada transición y quién ve el resultado completo? Una instalación puede cumplir sus pruebas internas y seguir fallando en el tramo entre la entrada del campus y el punto de presencia de un operador. Un proveedor puede cumplir disponibilidad en su propia demarcación y no controlar el último cross-connect hasta el equipo del cliente. El diseño debe señalar esas fronteras sin permitir que se conviertan en zonas sin dueño.

Facility, IT y servicio

Para coordinar especialidades ayuda distinguir tres planos:

Plano	Pregunta principal	Ejemplos de elementos
Facility	¿El sitio puede sostener la función física?	Energía, refrigeración, seguridad, edificio, puesta a tierra
IT y telecomunicaciones	¿La plataforma puede transportar y procesar datos?	Servidores, switches, routers, fibra, ópticas, almacenamiento

Plano	Pregunta principal	Ejemplos de elementos
Servicio	¿El usuario recibe el resultado acordado?	Aplicación, latencia, disponibilidad, pérdida, soporte, recuperación

La distinción no separa equipos; revela dependencias. Una MMR puede ser una sala dentro del facility, una frontera contractual para el carrier y una dependencia de la arquitectura de red. La nomenclatura cambia con el contrato. La función permanece: concentrar, ordenar, proteger y documentar la interconexión.

Los estándares y marcos de clasificación ayudan a establecer criterios comunes, pero describen alcances diferentes. TIA-942, la serie ISO/IEC 22237 y BICSI 002 abordan la infraestructura del centro de datos desde perspectivas complementarias; el sistema Tier de Uptime Institute evalúa topología y sostenibilidad operacional en su propio marco. Ninguna etiqueta aislada demuestra que la ruta exterior, el contrato del operador y la aplicación del cliente cumplan el objetivo de conectividad. La selección de norma debe hacerse al inicio del proyecto, junto con la matriz de cumplimiento y la edición aplicable [1–5].

El modelo de conectividad comprobable

Este libro utiliza un modelo de seis capas para describir la conectividad sin reducirla a una compra de ancho de banda:

1. **Intención de servicio:** aplicaciones, destinos, usuarios y objetivos de desempeño.
2. **Red interna:** fabric, cableado, puertos, rutas internas y políticas.
3. **Demarcación:** MMR, cross-connects, puntos de entrega y responsabilidades.
4. **Planta física:** entradas, ductos, cámaras, rutas, edificios y derechos de vía.

5. **Ecosistema externo:** carriers, IX, cloud on-ramps, DCI y rutas internacionales.
6. **Aseguramiento operacional:** pruebas, telemetría, cambios, fallas y evidencias.

Cada capa debe contestar cinco preguntas: ¿qué capacidad entrega?, ¿qué rendimiento alcanza?, ¿qué ruta física sigue?, ¿qué falla puede interrumpirla? y ¿qué prueba demuestra su estado? Esta matriz de preguntas se puede usar en una selección de sitio, una licitación o un plan de aceptación.

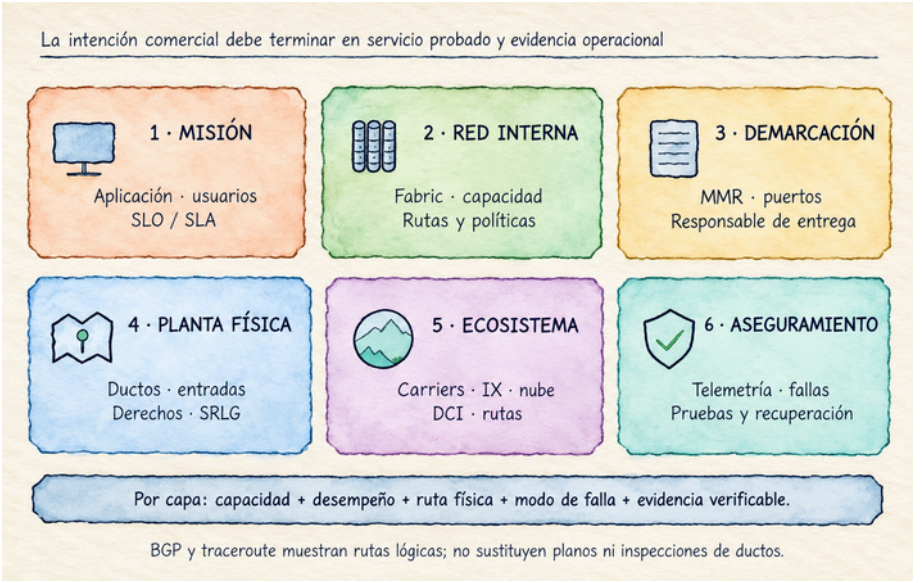


Figura 20. Seis capas para comprobar conectividad

Lectura. El modelo parte de la misión del servicio y sigue la red interna, la demarcación, la planta física, el ecosistema de proveedores y el aseguramiento operacional. En cada capa se pregunta por capacidad, desempeño, ruta, falla y evidencia. Así se conecta la especificación del cliente con una prueba repetible de extremo a extremo.

Caso de lectura: dos enlaces y una sola ruta

Imaginemos un campus que contrata dos servicios de operadores distintos. Los dos enlaces entran por la misma cámara, recorren el mismo duct bank y convergen en una sala antes de dividirse dentro del edificio. La diversidad comercial existe: hay dos contratos y dos

mesas de soporte. La diversidad física no está demostrada. Una excavación en la cámara común puede interrumpir ambos enlaces.

La conclusión no es que la arquitectura sea inútil. Puede ser una decisión válida para resiliencia contractual, capacidad o negociación. El error sería etiquetarla como protección completa contra corte de ruta. Un diseño verificable describe la protección que sí existe, los riesgos que permanecen y el costo de reducirlos.

Preguntas de aplicación

1. ¿Qué recorrido completa el servicio desde el usuario hasta la aplicación, y qué proveedor o frontera contractual podría dejar una falla sin responsable?
2. ¿Qué punto único de falla queda fuera de la demarcación del proveedor principal?
3. ¿Qué trazas y mediciones de extremo a extremo prueban el servicio contratado?

Práctica de dominio

Elija una aplicación y anote destinos, ancho de banda, latencia, pérdida, disponibilidad, localización y efecto comercial de una interrupción.

Decisión de diseño. Antes de contar enlaces, dibuje el trayecto del servicio y marque cada punto de cambio de dueño, tecnología y dominio físico. Si una parte no puede ser dibujada con la información disponible, convierta esa falta de información en un requisito de due diligence.

16. De la carga digital al presupuesto de conectividad

Objetivo del capítulo: definir presupuestos de latencia, pérdida y capacidad, junto con un método reproducible de medición.

La aplicación define la red que necesita

“Baja latencia” y “alta disponibilidad” no son especificaciones mientras no se relacionen con una aplicación, un punto de medición y una condición de carga. Una plataforma de respaldo puede tolerar segundos de demora y utilizar rutas largas de alta capacidad. Una transacción interactiva puede sentir cada ida y vuelta. Una sesión de inferencia puede depender de varias llamadas a servicios distintos. Una gran tarea de entrenamiento puede transmitir muchos datos y verse afectada por el retraso de un único nodo que llega tarde a un paso colectivo.

El análisis empieza clasificando flujos, no productos de telecomunicaciones. Por cada aplicación se registran origen, destino, dirección dominante, volumen, periodicidad, criticidad, ventana de uso y tolerancia a degradación. También se identifican flujos de control, telemetría, replicación, almacenamiento, administración fuera de banda y tráfico de usuario. Mezclarlos en una sola cifra de ancho de banda oculta comportamientos distintos.

Un presupuesto de latencia que se puede discutir

La latencia extremo a extremo suma varios componentes: propagación, equipos de transporte, conmutación y encaminamiento, colas, procesamiento de aplicación y esperas causadas por el protocolo. La parte física impone un límite: la señal viaja por fibra a una fracción de la velocidad de la luz en vacío. Como aproximación de ingeniería, la fibra aporta cerca de cinco microsegundos por kilómetro en un solo sentido; el recorrido de ida y vuelta depende de la longitud real de ruta, que rara vez es igual a la distancia en línea recta.

Estimación conceptual:

Latencia de ida y vuelta ≈ 2 × longitud óptica × 5 microsegundos/km + equipos + colas + procesamiento

Si una ruta óptica de ida mide 100 km, el aporte de propagación de ida y vuelta es aproximadamente 1 ms antes de sumar equipos, rutas asimétricas, colas y procesamiento. Este cálculo sirve para descartar expectativas físicamente imposibles y comparar escenarios. No sustituye una medición desde los puntos reales ni constituye un SLA.

La solicitud de desempeño debe precisar al menos:

Variable	Cómo expresarla	Por qué importa
RTT	p50, p95 y p99 entre extremos definidos	El promedio puede ocultar colas largas
Pérdida	Porcentaje y ventana de medición	La pérdida puede disparar retransmisiones
Jitter	Variación del retardo	Afecta voz, video y ciertos flujos en tiempo real
Throughput	Carga útil sostenida y metodología	El puerto nominal no garantiza capacidad extremo a extremo
Failover	Tiempo y pérdida durante conmutación	Define el impacto de una falla o mantenimiento
Disponibilidad	Punto de medición, período y exclusiones	Permite comparar el SLA con la experiencia real

Los percentiles deben acompañarse de una ventana y una metodología. RTT p99 mensual, por ejemplo, no equivale a RTT p99 en una hora de congestión. Toda medición necesita decir dónde se genera, dónde termina, qué protocolo usa y si se ejecuta con carga simultánea.

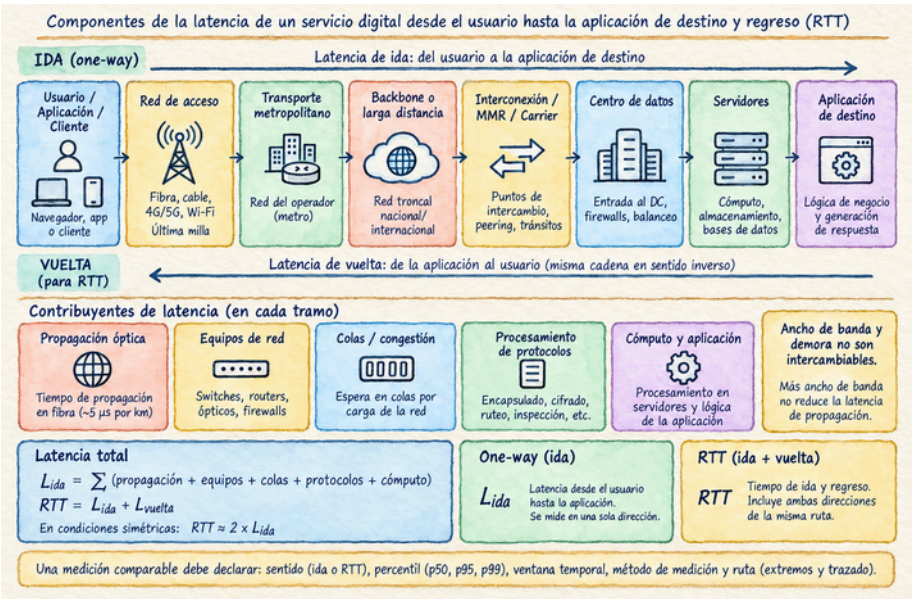


Figura 21. Presupuesto de latencia de extremo a extremo

Lectura. La demora observada suma propagación, equipos, colas, procesamiento y comportamiento del protocolo. La longitud óptica impone un mínimo físico, pero el RTT real depende del recorrido, los extremos, la carga y la aplicación. Una medición comparable declara sentido, percentil, ventana, método y ruta.

Ancho de banda y demora no son intercambiables

Un enlace puede tener gran capacidad y latencia elevada; otro puede tener menor capacidad y respuesta rápida. El ancho de banda condiciona cuánto dato se puede transportar por unidad de tiempo. La latencia condiciona cuánto tarda una interacción en completar sus dependencias. En una carga que genera múltiples llamadas secuenciales, una pequeña demora por viaje puede acumularse. En una transferencia masiva, el tamaño de la ventana TCP, el producto ancho de banda-retardo, la congestión y la pérdida pueden determinar cuánto de la capacidad teórica se aprovecha.

El diseño debe evitar perseguir el número más alto de gigabits sin conocer la carga. Para una consulta empresarial de IA, el usuario puede esperar autenticación, recuperación de documentos, llamadas a herramientas, consulta a sistemas internos, inferencia y

respuesta. Algunas etapas se ejecutan en paralelo; otras dependen de la anterior. La red no explica por sí sola todo el tiempo de respuesta, pero puede volver imposible cumplir el objetivo si consume una parte excesiva del presupuesto.

Presupuesto por clase de tráfico

Un centro de datos suele atender varias clases de servicio. Para cada una se definen prioridad, clase de pérdida, tratamiento de congestión, límites de latencia, capacidad mínima y comportamiento durante contingencia. El documento de requisitos debe separar tráfico de producción, replicación, sincronización de almacenamiento, gestión, respaldo, seguridad y tareas de cómputo distribuido. En IA, separar el tráfico de front-end del tráfico de entrenamiento y de almacenamiento ayuda a impedir que una transferencia masiva degrade una interacción de usuario.

Preguntas de aplicación

1. ¿Qué latencia de extremo a extremo exige la aplicación, dónde se consume ese presupuesto y cómo se medirá desde los extremos que usa el cliente?
2. ¿Qué cambio de ruta o congestión puede consumir el margen de latencia?
3. ¿Qué método, extremos, percentiles y registros de ruta hacen comparable la medición?

Práctica de dominio

Construya un presupuesto de red para dos rutas. Declare extremos, supuestos, percentiles, carga de prueba y margen de crecimiento.

Decisión de diseño. Traduzca cada promesa de red a una variable medible y cada variable a un punto de prueba. Una frase como “conectividad de baja latencia” debe convertirse en destino, percentil, ventana, carga, ruta y umbral de aceptación.

17. El sitio conectado se demuestra antes de construir

Objetivo del capítulo: evaluar conectividad territorial antes de comprometer una ubicación o fase de inversión.

La conectividad comienza en el territorio

La elección de un sitio suele girar alrededor de suelo, permisos, potencia, agua, transporte y costo. La fibra puede quedar relegada a una consulta informal al operador. Esa secuencia introduce un riesgo: el terreno puede estar adquirido y la energía encaminada antes de descubrir que la conectividad depende de una sola ruta, de un plazo de construcción incompatible o de un punto de interconexión distante.

La cercanía de un cable en un mapa no demuestra disponibilidad. Hay que conocer la ruta, el derecho de vía, las cámaras, cruces, ocupación, capacidad, accesos, permisos, plazo y punto de demarcación. Una tubería vacía no equivale a un servicio activo; una fibra cercana no garantiza pares disponibles; una oferta de un carrier no significa diversidad física respecto de otra oferta.

FIBER READY: de la afirmación a la evidencia

Para comparar sitios se puede aplicar una evaluación de conectividad con cinco dimensiones:

Dimensión	Pregunta de control	Evidencia mínima
Acceso	¿Pueden entrar rutas físicas al campus?	Plano, servidumbres y permiso de ocupación
Diversidad	¿Las entradas evitan dependencias comunes?	Mapas de ruta y declaración de riesgos compartidos
Ecosistema	¿Hay operadores y destinos relevantes?	Lista de activos, PoP, IX y servicios confirmados

Dimensión	Pregunta de control	Evidencia mínima
Capacidad	¿Puede ampliarse lo requerido y sobrevivir la contingencia?	Capacidad disponible y escenario de fallo
Calendario	¿Cuándo se puede prestar el servicio?	Hitos, responsables, restricciones y dependencias

La escala de madurez puede ser simple: no demostrado, en investigación, factible con condiciones o demostrado. Si se utiliza una puntuación numérica, deben publicarse las ponderaciones y el criterio que convierte una evidencia en puntaje. No se recomienda sumar notas que oculten una condición fatal. Un sitio con una única ruta expuesta puede quedar descartado para una aplicación que exige diversidad, aunque obtenga buena calificación en otras variables.



Figura 22. FIBER READY como cadena de evidencia

Lectura. Un sitio está preparado para conectividad cuando el acceso puede construirse y la ruta llega a los destinos mediante operadores y capacidades verificadas. La revisión sigue ductos, cámaras, cruces, entradas, MMR, PoP, derechos, plazos y contrato. Una ruta comercial en un mapa no demuestra diversidad ni fecha de servicio.

El paquete de due diligence

Antes de la decisión de inversión se solicita un data room de conectividad. Debe incluir mapas de rutas con fecha y nivel de precisión, puntos de presencia, responsables de cada tramo, capacidad disponible, tipo de servicio, alternativas de expansión, restricciones de construcción, estimaciones de plazo, condiciones de mantenimiento, riesgos geográficos y límites de SLA. Las respuestas deben señalar qué proviene de una fuente pública, qué fue confirmado por un operador y qué sigue siendo una hipótesis.

El diseño de sitio también mira la evolución: fases futuras, densificación de racks, crecimiento de tráfico entre campus, nuevos accesos al cloud, rutas internacionales y operaciones de mantenimiento. Una entrada que sirve para la primera sala puede

convertirse en cuello de botella si el campus crece sin reservar ductos, espacio de terminación y capacidad de obra civil.

Evidencia de campo: lo visible y lo que falta demostrar

El mapa de un operador y la inspección física responden preguntas distintas. Una visita puede confirmar que existe una cámara, un cruce, un poste, una canalización o un acceso de mantenimiento; por sí sola no demuestra que una fibra comercial use ese elemento ni que dos ofertas recorran trayectos independientes. El expediente separa lo observado, lo declarado por el proveedor, lo verificado en documentos y lo medido en servicio.

Observación de campo	Qué permite afirmar	Qué falta comprobar
Dos canalizaciones llegan a fachadas distintas	Hay dos aproximaciones visibles al campus	Si divergen desde la central, si comparten puente, cámara, ducto troncal o derecho de paso
Obras de terceros en el corredor	El entorno y las condiciones de acceso pueden cambiar	Titularidad, calendario, permisos, coordinación y efecto sobre rutas existentes
Cruce de río, carretera o ferrocarril	Existe un punto que puede concentrar exposición física	Si cada operador utiliza cruces separados y qué alternativa existe durante la reparación
Tendido aéreo, vegetación o postes	La ruta puede ser vulnerable a clima, poda, obras o impacto de vehículos	Inventario de activos, mantenimiento, exposición y tiempo real de acceso
Cámara o empalme accesible	El personal podría inspeccionar o reparar el tramo	Derecho de acceso, seguridad, responsable, repuestos y autorización para intervenir

El registro de inspección consigna fecha, coordenadas con acceso controlado, identificador de fotografía, dirección de observación, condición del activo, permiso de ingreso, restricciones y responsable. Las fotografías documentan el estado observado, no la

topología completa. La visita debe acompañarse de planos conforme a obra, trazado del proveedor, inventario de terceros y, cuando sea posible, una caminata conjunta con el titular de la infraestructura.

La evidencia de ruta se clasifica por nivel: **indicio** (mapa público o cercanía), **declaración** (respuesta escrita del operador), **trazado revisado** (segmentos y dependencias identificados), **verificación física** (recorrido o inspección autorizada) y **comportamiento medido** (prueba desde los extremos acordados). Un nivel no sustituye al siguiente: la prueba de RTT no revela por sí sola qué ductos están bajo tierra, y una visita no prueba qué camino toma el tráfico.

Interdependencias con energía y refrigeración

La red exterior y la sala de interconexión tienen necesidades físicas: espacio, energía, puesta a tierra, control de acceso, bandejas, climatización y capacidad para instalar equipo del operador. Un edificio que coloca las salas de telecomunicaciones detrás de una ruta única de energía o dentro del mismo riesgo físico que la sala principal puede introducir dependencias no deseadas. La coordinación temprana de energía, facility e IT permite reservar cuartos, bandejas, patinillos, cruces y zonas de mantenimiento.

En campus de alta densidad, las cargas de IA modifican el volumen de tráfico y la cantidad de enlaces internos, pero también compiten por espacio y rutas de cable. La expansión del cómputo, la refrigeración líquida y los nuevos buses eléctricos pueden alterar el diseño de bandejas y accesos. La conectividad no se añade al final de la coordinación tridimensional del edificio; forma parte de ella.

Caso de selección

Dos sitios ofrecen la misma potencia prevista. El sitio A tiene una ruta activa con expansión posible, pero la segunda entrada aún depende de un permiso vial. El sitio B tiene dos ofertas de

operadores y una ruta confirmada por cada uno, aunque ambos utilizan un cruce de río común. La tabla de decisión no debería resumir el resultado en “dos carriers en ambos sitios”. Debe describir calendario, capacidad, riesgos compartidos y remedios. La inversión puede avanzar con un riesgo condicionado, siempre que el hito de cierre esté ligado a evidencia y no a una promesa.

Territorio, permisos, servidumbres y coordinación de obras

La ruta dibujada en una presentación no es todavía una ruta desplegable. Cada tramo debe contar con un derecho de construcción, ocupación, acceso, mantenimiento y reparación que corresponda a la jurisdicción y al titular del terreno. Una servidumbre puede permitir instalar un ducto y no cubrir excavaciones futuras; una autorización de cruce puede tener una ventana o método constructivo específico; una cámara puede estar en un espacio público, pero el acceso requerir coordinación con un municipio o concesionario.

La due diligence territorial identifica propietarios, límites, zonificación, uso de suelo, accesos, servidumbres, permisos ambientales, municipales y sectoriales, cruces con carreteras, ferrocarriles, cauces, puentes, redes de agua, energía y gas; derechos sobre postes y ductos; restricciones de patrimonio; y obligaciones de reposición de pavimentos. También pregunta cómo se gestionan desvíos y trabajos de terceros, quién recibe avisos de nuevas excavaciones y cómo se autoriza una reparación de emergencia.

Elemento del trazado	Documento o inspección	Riesgo si falta	Responsable de cierre
Propiedad y derecho de paso	Título, permiso, contrato o servidumbre georreferenciada	Obra detenida, litigio o acceso de reparación impedido	Legal, propietario y desarrollador

Elemento del trazado	Documento o inspección	Riesgo si falta	Responsable de cierre
Carretera y espacio público	Permiso de ocupación, plan de tránsito y restitución	Retraso, multa, daño a infraestructura existente	Autoridad vial, municipio y contratista
Cruce de ferrocarril, cauce o puente	Autorización específica, diseño y método constructivo	Rechazo de cruce o falla por condición estructural	Dueño de infraestructura y diseñador habilitado
Ductos, cámaras y postes de terceros	Convenio, inventario, inspección y capacidad	Dependencia no revelada, saturación o conflicto de uso	Titular de planta y operador
Coordinación de obras	Registro de proyectos, fechas y contactos	Corte accidental, cambio de ruta o reprogramación	Coordinador territorial y empresas de servicios
Reparación y acceso	Acuerdo de entrada, contacto 24/7 y procedimiento	MTTR alto aunque exista personal y repuestos	Dueño de ruta, autoridad y operación

La coordinación con proyectos viales y servicios públicos tiene que preceder a la construcción, no limitarse al permiso inicial. El calendario de pavimentación, remodelación urbana, ampliación de autopistas o traslado de servicios puede cambiar la ventana de despliegue. Se recomienda revisar etapas de diseño y licitación pública, mantener una bitácora de obras planificadas y acordar procedimientos de notificación y excavación segura.

La evidencia final es un registro por tramo con coordenadas, titular, derecho, fecha de expiración, límites, restricciones, contacto, inspección, obra ejecutada y versión as-built. Si una ruta atraviesa un área sensible, el plan de recuperación debe documentar accesos alternativos, permisos de emergencia, equipo, repuestos y autoridades requeridas. Así se conecta el mapa geográfico con la continuidad del servicio y el costo de reparación.

Campus Horizonte | Conectividad antes de construir

Expediente hipotético H-08. Dos ofertas comerciales A y B aparecen en el expediente, pero no incluyen trazado autorizado, derechos de paso, mapa de ductos, demostración de cruce diverso ni fecha de RFS. El estado de la puerta de fibra continúa «condicionado»; la cantidad de carriers, por sí sola, no habilita ningún MW.

Para cada bloque se solicita al menos una ruta de trabajo y una alternativa de recuperación con capacidad y extremos definidos. Una ruta C será un proyecto de mitigación hasta que se confirmen geografía, permisos, red remota, contrato y pruebas.

Preguntas de aplicación

1. ¿Qué evidencia confirma que las rutas de fibra son desplegables, físicamente diversas y capaces de llegar a los destinos comerciales antes de construir?
2. ¿Qué obra, permiso o derecho de paso podría impedir activar la segunda ruta?
3. ¿Qué levantamiento de campo y derecho de paso prueban la ruta alternativa?

Práctica de dominio

Compare dos sitios con el atlas del capítulo. Registre operadores, rutas, derechos, destinos, tiempos de activación y dependencias comunes.

Decisión de diseño. Trate la fibra como un criterio de selección del terreno y un hito de inversión. Defina con anticipación qué evidencia transforma una posibilidad comercial en una capacidad construible.

Parte IV · Conectar el centro al ecosistema digital

18. De la calle a la MMR

Objetivo del capítulo: seguir una ruta física desde la vía pública hasta la MMR y documentar demarcaciones.

La ruta no comienza en el muro

Una ruta de conectividad crítica empieza en la infraestructura del operador y termina en el equipo o demarcación que presta el servicio. Entre ambos puntos están los derechos de vía, ductos, cámaras, empalmes, cruces, entradas al campus, salas de acceso, bandejas, risers y MMR. Si la revisión empieza cuando el cable entra al edificio, el riesgo de los primeros kilómetros ya quedó fuera del diseño.

La secuencia de diseño debe dibujar y nombrar, por separado, la red de larga distancia, la red metropolitana, el tramo de acometida, la entrada al campus, la sala de entrada, la MMR y los pathways hasta el cliente. Un tramo puede ser propiedad del operador, arrendado a un tercero o construido para el proyecto. Cada cambio de custodia debe aparecer en planos y matrices de responsabilidad.

Sala de entrada y MMR

La sala de entrada recibe cables exteriores y permite su transición controlada al edificio. La MMR concentra terminaciones y facilita que operadores y clientes establezcan cross-connects. Puede albergar ODF, paneles, rutas de patching, espacio de carriers, puesta a tierra, control de acceso, monitoreo ambiental y puntos de demarcación. Las funciones exactas dependen del modelo comercial y del diseño.

El espacio debe facilitar ampliación y mantenimiento. Se reserva capacidad para guías de cable, bandejas, radios de curvatura, separación de rutas, identificación visible y accesos seguros. La

política de acceso define quién puede instalar, desconectar, acompañar visitas y autorizar cambios. Un cross-connect no es solo un latiguillo: es una conexión con puerto de origen, puerto de destino, servicio, propietario, orden de trabajo, estado y ruta de respaldo.

MMR A y B: independencia por capas

Dos salas etiquetadas A y B no prueban independencia. Hay que comparar la exposición exterior, la entrada al campus, las cámaras, los ductos, los cruces, la sala de entrada, las alimentaciones, los risers y los caminos interiores. Cada diferencia debe ser verificable. Una ruta puede estar separada en el edificio y volver a compartir el ducto en el límite del campus; otra puede usar ductos distintos pero converger en una cámara de operador.

Dominio	Pregunta para A/B	Evidencia posible
Exterior	¿Comparten corredor, puente o cámara?	Levantamiento, planos y declaración del operador
Campus	¿Tienen entrada y ductos distintos?	As-built, inspección y trazado de ductos
Edificio	¿Separan sala, riser y bandeja?	Planos coordinados y recorrido físico
Energía y control	¿Comparten una dependencia local?	Esquemas eléctricos y matriz de control
Operación	¿Se pueden mantener por separado?	Procedimientos y ejercicios de mantenimiento

La separación debe reflejar el evento que se quiere evitar. Separar dos MMR ayuda frente a una falla localizada en una sala; puede ser insuficiente frente a un incendio de campus o una obra que corte el duct bank principal. La arquitectura se compara con escenarios, no con nombres de salas.



Figura 23. Recorrido exterior hasta el equipo: comparar ambas rutas

Lectura. El esquema muestra los tramos que deben compararse antes de declarar diversidad: carrier, ruta OSP, entrada al campus, sala de entrada o MMR y cross-connect. Los nombres comerciales no prueban separación física; cada tramo debe asociarse a un trazado, un responsable y una condición de falla.

Demarcación y ownership

Los contratos deben señalar el punto donde se transfiere responsabilidad por señal, equipo y mantenimiento. Una frontera ambigua crea demoras durante incidentes. La matriz debe indicar quién resuelve fallas en el cable exterior, el equipo del carrier, el ODF, el cross-connect, el patch cord, la óptica del cliente y la configuración de red.

Del derecho de vía a la orden de servicio

La disponibilidad comercial de un proveedor no garantiza que una ruta pueda entrar al sitio. La due diligence confirma si el carrier tiene licencia, derecho de uso o contrato mayorista sobre cada tramo; qué obras debe construir; qué permisos necesita; quién asume reposición de pavimento; y si puede llegar a la fecha de

energización. Un mapa de cobertura suele ser una herramienta comercial. Para invertir se requiere una visita de ruta, planos razonables, derechos de acceso, presupuesto y una declaración clara de dependencias de terceros.

El proceso de activación del cross-connect también forma parte del producto del centro. El operador define un catálogo de demarcaciones, puertos, velocidades, medios, horarios, costos, tiempos de provisión, controles de acceso y pruebas. La orden debe correlacionar cliente, servicio, puerto A, puerto Z, ruta, número de circuito, carrier, fecha y responsable. Un servicio rápido de interconexión crea valor cuando el inventario está actualizado y la conexión queda documentada; una orden desconectada del mapa físico crea deuda de operación.

La neutralidad se evalúa en gobernanza: criterios de ingreso de carriers, acceso a salas, tratamiento de competidores, resolución de disputas, manejo de información sensible y condiciones de cross-connect. Una MMR abierta puede ampliar opciones; no elimina la necesidad de políticas de seguridad, control de cambios y separación física.

Campus Horizonte | Dos MMR no equivalen a dos rutas

Expediente hipotético H-09. La ingeniería conceptual dibuja MMR A y B con accesos diferentes. La diligencia no puede aprobar su independencia mientras desconozca cámara exterior, cruces, sala de entrada, energía, ducto compartido, titularidad y autorización de intervención. El entregable es un pasaporte por recorrido: tramo, operador, activo, dominio de falla, foto o plano, vigencia y responsable.

Preguntas de aplicación

1. ¿Las rutas A y B permanecen separadas desde el derecho de vía hasta la MMR, y qué inspección revela cualquier punto de convergencia?
2. ¿Qué elemento compartido puede hacer converger dos entradas que parecen independientes?
3. ¿Qué planos de ductos, inspección de cámaras y as-built sustentan la independencia?

Práctica de dominio

Dibuje dos rutas hasta la MMR y marque cámaras, cruces, derechos y puntos sin diversidad. Exija planos as-built con identificadores, coordenadas, orientación y versión comunes.

19. Ingeniería de fibra y planta óptica

Objetivo del capítulo: especificar, medir, aceptar y mantener una planta de fibra óptica.

Diseñar para los extremos y para la intervención

La fibra se selecciona considerando distancia, número de fibras, uso actual y futuro, ópticas previstas, pérdidas, expansión, protección mecánica, ambiente, instalación, mantenibilidad y compatibilidad con el equipamiento. Una reserva razonable de fibras puede costar poco en comparación con abrir nuevamente una ruta urbana, pero la reserva debe basarse en el crecimiento previsto y el espacio disponible para terminación.

La fibra monomodo suele ser la base para enlaces de campus, metro y larga distancia. Los tipos de fibra, radios de curvatura, componentes, conectores y prácticas de instalación se especifican conforme a las normas aplicables y a las interfaces de los equipos. El diseñador debe evitar tratar un valor genérico de pérdida como criterio universal: límites dependen de longitud, número de conectores, empalmes, ópticas y protocolo.

Las recomendaciones ITU-T describen características de familias de fibra monomodo, incluidas G.652 y G.657. El proyecto debe confirmar la categoría instalada, la edición de la recomendación, el desempeño de los componentes y las condiciones de instalación; el nombre de la familia no sustituye una medición de aceptación [9–10].

Topología y nomenclatura

La planta debe distinguir rutas, cables, tubos, fibras, empalmes, paneles, puertos, cross-connects y circuitos. El esquema de identificación debe ser legible por quien instala, quien opera y quien investiga una avería. Los códigos opacos que solo entiende un proveedor dificultan el cambio de operador o la recuperación.

Cada enlace requiere una ficha que incluya origen, destino, identificador del circuito, operador, ruta, cable, fibras, terminaciones, empalmes, longitud, tipo de conector, ópticas, presupuesto de pérdida, pruebas de aceptación, fecha y responsable. El registro debe tener control de versión y relacionarse con los planos de planta. La ficha y el diagrama se actualizan después de un cambio físico.

Cableado estructurado: cobre y fibra

La planta de comunicaciones combina cableado horizontal de cobre, fibra óptica, latiguillos, paneles, troncal, conexiones directas y enlaces de alta velocidad. La tecnología se selecciona según alcance, velocidad, potencia, latencia, densidad de puertos, facilidad de cambio y soporte de la óptica elegida. El cobre puede ser adecuado para enlaces cortos de acceso, gestión y otros usos definidos; la fibra sirve una variedad amplia de troncales, interconexiones y puertos de alta velocidad. No se debe especificar un tipo de cable por costumbre sin validar canal completo, equipo, conectores y norma aplicable.

El esquema identifica las áreas desde la entrada de servicios y la distribución principal hasta zonas, racks y equipos. Las bandejas y canalizaciones deben permitir acceso, crecimiento y separación respecto de energía y otros servicios. En enlaces de cobre se verifica categoría, longitud de canal, terminación, continuidad, mapa de pares y parámetros de certificación. En fibra se verifica tipo, polaridad, conectividad, pérdida y línea base de eventos. En ambos casos se marcan los dos extremos y se registran puertos, paneles, destino, propietario y fecha de aceptación.

Para troncales de alta densidad, conectores multifibra y breakout, el diseño comprueba número de fibras, polaridad, método de inspección/limpieza, disponibilidad de puertos, transceptores y plan de migración. Una ruta ordenada facilita diagnóstico; no sustituye certificación ni confirma por sí sola que el servicio cumple el rendimiento acordado.

Presupuesto óptico

La potencia recibida depende de la potencia transmitida menos las pérdidas del trayecto y de los márgenes de ingeniería. En una ruta se consideran fibra, conectores, empalmes, elementos pasivos, curvaturas, envejecimiento y tolerancias de medición. El presupuesto debe dejar margen para operación y no ajustarse al mínimo en la primera puesta en servicio.

La inspección de conectores, limpieza y manejo de latiguillos es una acción de confiabilidad, no cosmética. Un conector contaminado puede aumentar pérdidas y reflejos, producir degradación intermitente o dañar la interfaz. Los procedimientos definen inspección, limpieza, reinspección, protección de extremos y registro del trabajo.

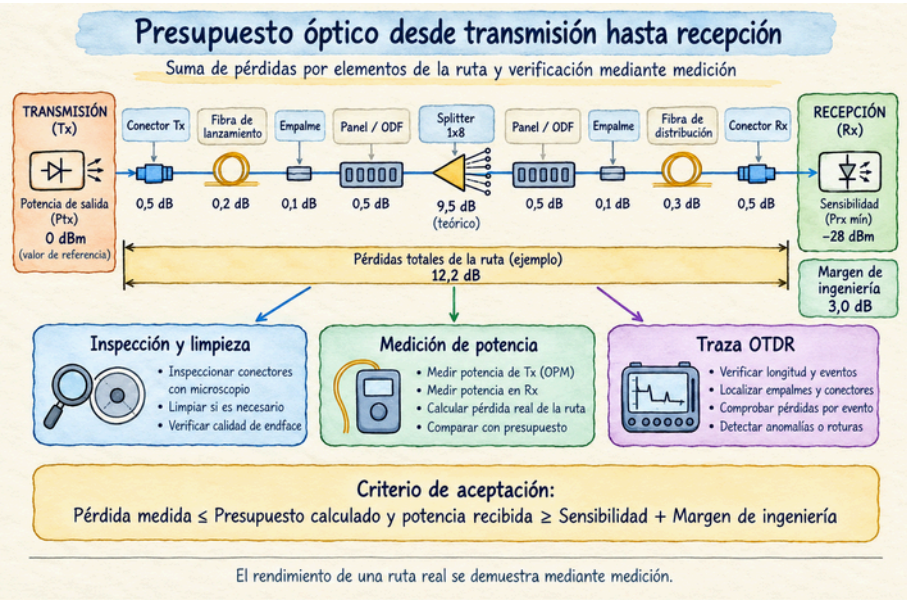


Figura 24. Presupuesto óptico desde transmisión hasta recepción

Lectura. La potencia recibida se calcula descontando pérdidas de fibra, empalmes, conectores y componentes, además del margen de ingeniería. La aceptación combina inspección y limpieza de conectores, mediciones de potencia y trazas OTDR con métodos y límites acordados. El rendimiento de una ruta real se demuestra mediante medición.

Pruebas complementarias

La prueba de continuidad confirma que existe un camino; no demuestra por sí sola su rendimiento. La medición de pérdida de inserción y reflectancia permite caracterizar el enlace de extremo a extremo con una fuente y medidor apropiados. El OTDR aporta una traza de eventos a lo largo de la ruta, ayuda a localizar empalmes y anomalías y establece una línea base para comparar cambios. Las pruebas se realizan en la longitud de onda, dirección, configuración y método acordados.

Los informes deben guardar trazas nativas y resultados tabulados, no solo una captura o un resultado aprobado. La línea base se conserva junto al as-built y se repite tras modificaciones relevantes. Un OTDR no sustituye la medición de pérdida de inserción ni confirma el comportamiento de la óptica activa bajo carga. Cada instrumento responde una pregunta distinta.

Gestión de rutas y cableado

La planta física debe documentar el recorrido, las entradas, los cruces, los puntos de acceso, las cámaras, las reservas de cable y las condiciones de protección. En interiores se mantiene separación de caminos cuando la arquitectura lo exige, control de radios de curvatura, capacidad de bandejas, acceso de mantenimiento, etiquetado en ambos extremos y barreras de fuego. Las rutas reservadas para A y B no se mezclan por conveniencia durante la construcción sin una revisión formal del riesgo.

La gestión de fibra incluye la vida completa: diseño, instalación, inspección, empalme, pruebas, aceptación, operación, reparación y retiro. La ubicación del plano maestro debe ser conocida y accesible a los responsables de guardia. La ruta que nadie puede localizar a las tres de la mañana no es una ruta bajo control operacional.

Compra de fibra y aceptación de la planta exterior

La RFP de fibra debe describir el uso y no solo el metraje. Solicita número de fibras inicial y reserva, tipo de fibra, construcción del cable, empalmes, conectores, cajas, radios, protección, coordinación con energía, permisos, horario de obra, restitución, pruebas, documentación y reparación. Para una ruta arrendada, añade propiedad de los activos, derechos de acceso, capacidad de crecimiento, exclusiones, tiempos de reparación y condiciones de cambio de proveedor.

Entregable de OSP	Qué debe permitir verificar
Diseño y trazado	Continuidad de ruta, derechos, cámaras, cruces, puntos de riesgo y empalmes
Especificación de materiales	Cable, ducto, microducto, cierres, paneles, herrajes y compatibilidad
Permisos y derechos	Quién solicita, quién paga, vencimientos y restricciones de obra
Registro de instalación	Tendido, soplado, empalmes, reservas, fotos, ubicación y excepciones
As-built común	Código de sitio, orientación, coordenadas controladas, tramo y versión
Pruebas de aceptación	Pérdida, reflectancia, trazas OTDR, longitudes de onda y criterios aprobados
Transferencia operacional	Contactos, repuestos, acceso a cámaras, reparación y ventana de cambio

El acceso a planos con coordenadas y ductos se limita por función. El inventario operacional conserva identificadores y vínculos a un repositorio seguro, de forma que el responsable de guardia pueda localizar el dato sin distribuir mapas detallados a quien no los necesita.

Preguntas de aplicación

1. ¿Qué mediciones ópticas, planos conforme a obra e identificadores permiten localizar, aceptar y mantener cada tramo de la planta de fibra?
2. ¿Qué degradación óptica podría superar el presupuesto aunque el enlace permanezca activo?
3. ¿Qué OTDR, pérdida de inserción y registro de calibración forman la línea base?

Práctica de dominio

Escriba un plan de aceptación de fibra que defina identificación, limpieza, método, instrumentos, criterios, trazas y línea base.

Decisión de diseño. Solicite una ficha legible por circuito y un conjunto reproducible de pruebas. Sin ambos, el activo está instalado, pero su transferencia a operación sigue incompleta.

20. Carriers, interconexión y DCI

Objetivo del capítulo: comparar ofertas de carriers, interconexión, BGP y DCI según capacidad y resiliencia real.

Los modelos de servicio no son equivalentes

Un carrier puede proveer transporte, IP transit, acceso a internet, ethernet, wavelength, dark fiber, conexión a un internet exchange, cloud on-ramp, capacidad internacional o DCI. Puede ser dueño de la infraestructura, operar sobre activos de terceros o combinar ambos modelos. El nombre comercial no revela automáticamente la ruta física ni el punto donde se mide el SLA.

Servicio	Control que recibe el cliente	Verificaciones necesarias
IP transit	Alcance IP a redes de internet según contrato	Rutas BGP, capacidad, filtros y medición del servicio
Peering/IX	Intercambio de tráfico con redes participantes	Política, puertos, VLAN, presencia y capacidad del IX
Dark fiber	Uso de una fibra sin equipo de transmisión del proveedor	Ruta, condición, reparación, pares y presupuesto óptico
Wavelength	Canal óptico gestionado por el proveedor	Demarcación, capacidad, protección y métricas ópticas
Ethernet gestionado	Servicio de capa 2 entre demarcaciones	MTU, clase de servicio, latencia y pérdida
Cloud on-ramp	Conexión privada hacia una plataforma cloud	Región, PoP, disponibilidad, capacidad y ruta de acceso
DCI	Conexión entre campus o centros de datos	Tráfico, ruta, latencia, protección y capacidad sobreviviente

El mercado carrier-neutral crea valor al permitir que distintos operadores, clientes y plataformas se interconecten. El número de

logos no mide la calidad de esa neutralidad. Importan la diversidad real de rutas, el proceso de cross-connect, los tiempos de provisión, la transparencia de demarcación, la competencia de precios, el acceso a IX y cloud y la habilidad para ampliar capacidad sin rehacer el edificio.

BGP, peering y ruta física

El plano IP y la planta física describen dimensiones diferentes. Una ruta BGP muestra qué sistemas autónomos anuncian prefijos y qué camino lógico se utiliza en un momento. Un traceroute revela saltos visibles según la política y configuración de los equipos. Ninguno de estos datos identifica de manera completa el ducto, el cable, la cámara o la servidumbre recorrida.

BGP-4 define el intercambio de información de alcanzabilidad entre sistemas autónomos. Esa información es esencial para entender el encaminamiento entre redes, pero no constituye un mapa de la infraestructura física subyacente [6].

La due diligence necesita ambas vistas. La ruta lógica informa política, alcance y comportamiento de encaminamiento. La ruta física informa exposición a cortes, riesgos comunes y posibilidad de reparación. En una licitación se solicita al operador una descripción suficiente para evaluar la diversidad, respetando los límites de seguridad y confidencialidad que correspondan.

De un producto carrier estándar a un servicio apto para misión crítica

Un producto punto a punto puede ser adecuado para muchas aplicaciones. El riesgo aparece cuando el comprador interpreta capacidad nominal, una etiqueta de protección o un SLA comercial como prueba de diversidad integral. En un centro de datos crítico, la ficha del producto se complementa con requisitos del servicio, evidencias de ruta y resultados de recuperación.

Aspecto de compra	Oferta de transporte habitual	Requisito que debe fijar el cliente crítico
Alcance	Dos demarcaciones y capacidad nominal	Extremos, interfaces, servicios incluidos y fronteras excluidas
Capacidad	Velocidad del puerto o circuito	Capacidad comprometida y utilizable, expansión y capacidad bajo contingencia
Diversidad	Protección lógica o segundo circuito	Dependencias físicas, puntos comunes, terceros y nivel de detalle verificable
Desempeño	Disponibilidad y métricas dentro de la red del proveedor	RTT por percentil, jitter, pérdida, carga, sentido y prueba hasta extremos del cliente
Visibilidad	Portal o soporte del carrier	Inventario compartido, cambios relevantes, alarmas, trazabilidad y coordinación de incidentes
Recuperación	Tiempo objetivo de reparación o créditos	Detección, conmutación funcional, restauración física, capacidad que sobrevive y ensayo
Operación	Mesa de ayuda y escalamiento comercial	Cobertura 24×7, contactos técnicos, acceso a sitio, permisos, repuestos y gestión de terceros

La diligencia de un comprador hyperscale o de un cliente grande debe resolver, como mínimo: ¿qué falla puede derribar ambas rutas?, ¿qué tráfico permanece tras perder la ruta principal?, ¿quién declara el cambio de corredor?, ¿cómo se mide el RTT antes y después del failover?, ¿qué plazo corresponde a recuperación funcional y cuál a reparación física?, ¿qué acceso y permisos requiere la cuadrilla?, ¿qué capacidad puede añadirse y en cuánto tiempo?, ¿qué partes del SLA quedan fuera de la demarcación? Las

respuestas deben aterrizar en contrato, matriz de responsabilidad, prueba de aceptación y un registro de excepciones.

Integridad de ruta y controles del plano IP

La continuidad del servicio depende también de que los anuncios y las políticas de encaminamiento sean correctos. Una ruta BGP puede cambiar sin que se modifique la fibra; una ruta física puede seguir disponible mientras una política lógica hace que el tráfico tome un camino inadecuado. Por eso la evaluación del carrier registra ambas vistas y relaciona los cambios de red con el servicio afectado.

RPKI Route Origin Validation (ROV) permite contrastar si el sistema autónomo que origina un prefijo está autorizado por el titular del recurso. Ese control reduce una clase de anuncios erróneos, pero no demuestra que todo el AS_PATH sea correcto, que el trayecto físico sea diverso ni que el tráfico llegue con el desempeño esperado. Debe acompañarse de políticas explícitas de importación y exportación, filtros de prefijos, límites documentados, monitoreo de cambios y un proceso de respuesta [11–14].

La protección contra fugas de rutas requiere considerar la relación entre vecinos, las políticas aplicadas en cada sesión y los mecanismos que detectan anuncios incompatibles. Los roles BGP y el atributo Only-to-Customer pueden aportar prevención y detección cuando ambos extremos y sus plataformas lo soportan; no reemplazan una política de encaminamiento bien definida ni la revisión del operador. Las capacidades de mitigación DDoS también se evalúan de extremo a extremo: punto de activación, capacidad, ruta de retorno, dependencias y cambio de latencia durante la limpieza.

Control	Pregunta de auditoría	Evidencia útil
Origen y prefijos	¿Qué prefijos y sistemas autónomos se autorizan para el servicio?	ROA aplicables, estado ROV, filtros y proceso de excepción

Control	Pregunta de auditoría	Evidencia útil
Importación y exportación	¿Qué se acepta y qué se anuncia en cada sesión?	Política por vecino, límites, registros de cambio y rollback
Fuga de rutas	¿Cómo se reconocen anuncios incompatibles con la relación entre redes?	Roles BGP/OTC cuando correspondan, monitoreo y procedimiento de respuesta
Mitigación DDoS	¿Dónde se limpia el tráfico y qué ocurre con su ruta y latencia?	Arquitectura, punto de activación, capacidad, tiempos y dependencias
Cambios de encaminamiento	¿Cómo se vincula un cambio lógico con el servicio y su ruta física?	Historial de configuración, alarmas, ID de servicio y responsable

La evidencia debe corresponder al servicio contratado y a la política realmente desplegada. Un diagrama de red o una declaración genérica de “protección BGP” no demuestra qué filtros operan, quién recibe las alertas ni cómo se recupera un cambio fallido. Las pruebas de aceptación comprueban el control dentro de un alcance acordado; no convierten una observación puntual en garantía permanente.

DCI y relación entre campus

El DCI conecta ubicaciones por continuidad, replicación, nube, transferencia de datos, almacenamiento o cómputo distribuido. Puede usar fibra oscura con ópticas propias, longitud de onda o servicio gestionado. El mejor modelo depende de distancia, capacidad, rapidez de expansión, competencia disponible, equipo operacional, necesidad de control y costo durante el ciclo de vida.

La capacidad nominal no basta. Se especifica RTT por percentil, pérdida, jitter cuando aplica, rendimiento bajo carga, comportamiento al fallar un tramo, capacidad que permanece disponible y tiempo de protección. La medición debe separar la

capa óptica del servicio Ethernet o IP y fijar ambos extremos. Un SLA medido entre equipos del proveedor puede no incluir el cableado interno del cliente ni el rendimiento de la aplicación.

Interconexión como producto

En un campus, la facilidad de conexión puede ser un diferenciador económico. Un cliente valora la cantidad de destinos alcanzables, la baja fricción para activar cross-connects, la cercanía a proveedores de nube, el acceso a múltiples operadores y la posibilidad de crecer sin rediseñar el sitio. Esta oferta requiere un catálogo claro, un proceso de provisión predecible, inventario actualizado, control de cambios, precios y SLAs consistentes.

La plataforma también necesita reglas de gobernanza: cómo se aprueba un operador, cómo se revisa seguridad, dónde se instala equipamiento, qué acceso físico se concede y cómo se documenta un cambio. La apertura comercial no significa acceso irrestricto a la infraestructura.

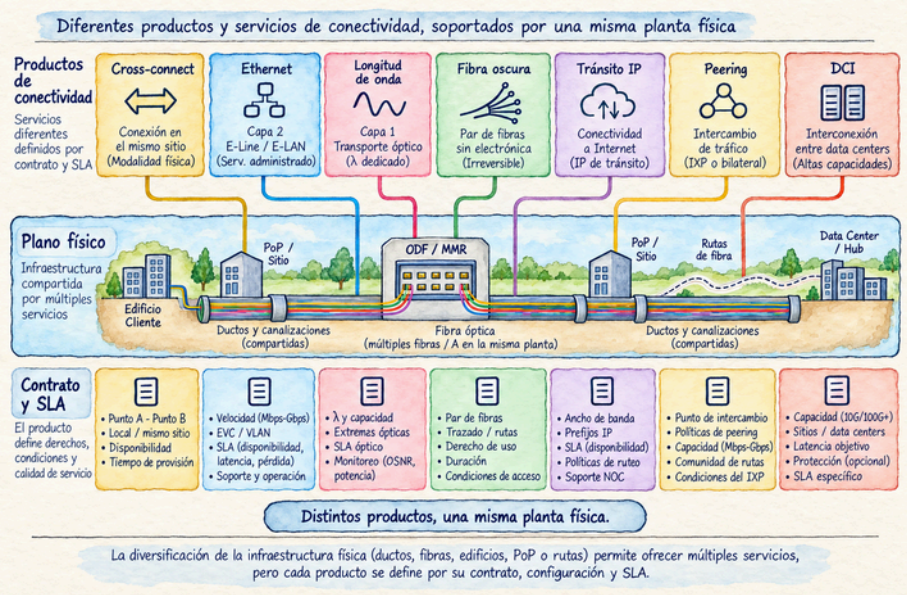


Figura 25. Productos de conectividad sobre una planta física

Lectura. Cross-connect, Ethernet, longitud de onda, fibra oscura, tránsito IP, peering y DCI son servicios diferentes, pero pueden compartir ductos, fibra, edificios o puntos de presencia. El contrato define capacidad, demarcación, operación y SLA; el plano físico prueba si las rutas también son diversas.

Casos de lectura: interconexión y plataformas

Los casos siguientes muestran modelos de valor que conviene analizar; la información corporativa describe productos y escala declarada por cada empresa, no constituye una auditoría independiente del servicio o de la diversidad física.

Equinix documenta cross-connects como enlaces punto a punto entre clientes de un IBX y ofrece servicios de interconexión dentro de su ecosistema [36, 37]. La lectura para el inversionista es que una MMR puede producir ingresos y acelerar la activación de clientes, además de alojar equipos. La pregunta técnica es qué conecta cada circuito, en qué edificios, por qué trayectoria, qué dependencias comparte y cómo se maneja una orden, cambio o falla. Un producto de interconexión no certifica por sí solo diversidad de cableado.

Digital Realty presenta PlatformDIGITAL como plataforma global de centros de datos, colocation e interconexión [38]. La lectura de diseño es que la estandarización y la presencia en varios mercados pueden ayudar a clientes con necesidades distribuidas; el valor de cada instalación depende todavía de potencia, fecha, densidad térmica, conectividad local, acuerdos y operación. En ambos casos, la escala comercial no reemplaza una revisión específica del sitio.

En Chile, ON*NET Fibra describe un modelo mayorista de fibra abierta a distintos operadores [39]. Es un ejemplo de la capa externa que puede extender el acceso de un campus a usuarios, empresas o redes de telecomunicaciones. Una red neutral puede facilitar opciones y evitar duplicar ciertos activos, pero el cliente del centro debe seguir trazando la acometida, la propiedad del último tramo, las rutas compartidas, la demarcación, el SLA y la capacidad real hasta el destino.

Campus Horizonte | La compra de red debe seguir al producto

Expediente hipotético H-10. La RFP del bloque inicial fija destinos concretos del cliente, capacidad primaria, capacidad sobreviviente, RTT por percentil, demarcación en MMR y obligaciones de conmutación. La existencia de un on-ramp o de capacidad iluminada en un backbone regional no prueba acceso utilizable desde el campus.

El costo de cada opción se compara por inversión física, tarifa recurrente, SLA verificable, plazo de activación, responsabilidad de reparación y desempeño después de una falla, no únicamente por el precio del puerto.

Preguntas de aplicación

1. ¿Qué servicio de carrier necesita el cliente, dónde están sus demarcaciones y qué dependencia física o lógica comparte con la alternativa?
2. ¿Qué tercero o dependencia compartida invalida la diversidad comercial declarada?
3. ¿Qué mapa físico, contrato y prueba de conmutación acreditan la ruta de respaldo?

Práctica de dominio

Convierta dos propuestas comerciales en una tabla de servicios comparables, rutas, puntos de demarcación, SLA, failover y exclusiones.

Decisión de diseño. Compare propuestas por resultado verificable, no por nombre del producto. En cada oferta anote activo controlado, punto de entrega, ruta física conocida, ruta lógica, capacidad garantizada, protección, métricas, límites y dependencia de terceros.

21. La red interna de la inteligencia artificial

Objetivo del capítulo: distinguir la red interna del clúster de IA de la conectividad externa del campus.

Una fábrica de cómputo es también una fábrica de tráfico

Los centros de datos de IA combinan aceleradores, memoria, almacenamiento, redes de alta velocidad, energía, refrigeración y software de orquestación. La red cambia según la etapa de trabajo. El tráfico de usuario y servicio suele entrar por una red front-end; los datos pueden leerse desde almacenamiento; los aceleradores intercambian gradientes, activaciones o fragmentos de datos por redes de baja pérdida; la gestión y el control requieren planos separados.

En entrenamiento distribuido, el tiempo de una tarea puede depender del participante más lento. Si muchos aceleradores esperan el cierre de una operación colectiva, una falla o congestión localizada puede reducir la productividad del conjunto. La red interna deja de ser un cableado accesorio y pasa a participar directamente en la utilización de los aceleradores.

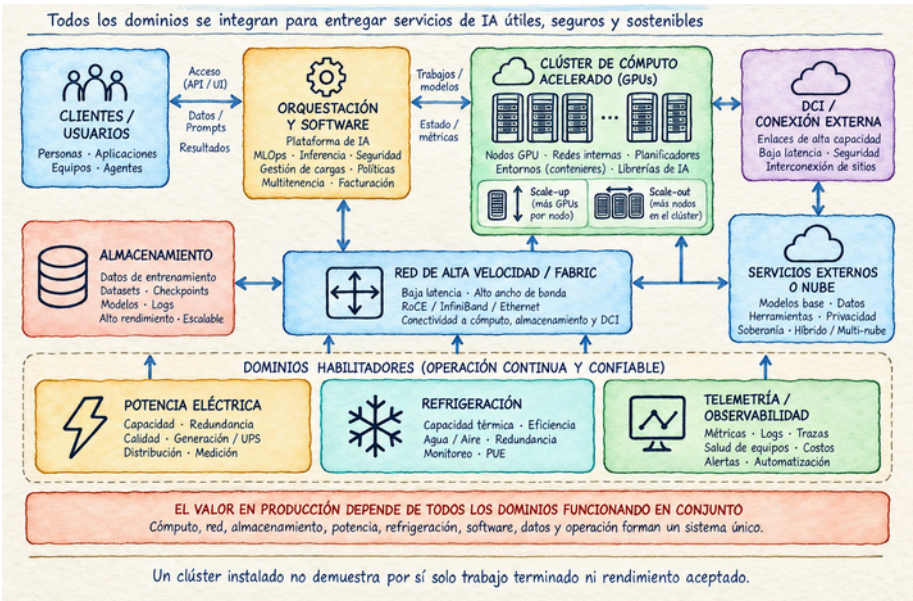


Figura 26. Anatomía funcional de una AI Factory

Lectura. La figura relaciona clientes y orquestación con cómputo acelerado, almacenamiento, DCI y servicios externos, e incorpora potencia, refrigeración y telemetría. La producción útil depende de que esos dominios funcionen juntos; un clúster instalado no demuestra por sí solo trabajo terminado ni rendimiento aceptado.

Scale-up y scale-out

Scale-up conecta componentes muy próximos para que funcionen como una unidad de cómputo más grande. Scale-out distribuye trabajo entre racks, filas o salas. Sus requisitos de distancia, densidad, topología y falla difieren. Las rutas de fibra de la fabric interna deben diseñarse junto con la ubicación de switches, racks, patch panels, bandejas, energía y enfriamiento.

La carga define la topología y las métricas

“IA” cubre operaciones con perfiles de red distintos. El dueño de la plataforma define qué se entrena o sirve, el tamaño de sus datos, la forma de paralelismo, los patrones de lectura y escritura y el tiempo de respuesta aceptable. Ese perfil determina dónde se

necesitan alto ancho de banda, baja latencia, aislamiento, buffers y recuperación.

Tipo de trabajo	Patrón de cómputo y tráfico	Consecuencia de diseño
Entrenamiento distribuido	Aceleradores intercambian estado y resultados de operaciones colectivas en rondas repetidas	La congestión o el participante lento puede extender el trabajo completo; medir job completion y fabric
Post-training y ajuste fino	Repite parte de la comunicación de entrenamiento con conjuntos y horarios distintos	Planificar ventanas, almacenamiento de datos y rendimiento para cargas variables
Inferencia interactiva	Solicitudes llegan desde usuarios o aplicaciones y esperan respuesta	Reducir demora de cola, mantener servicio frontal y dimensionar por concurrencia y objetivos de respuesta
Inferencia por lotes	Procesa muchos elementos con elasticidad de tiempo distinta	Programar ventanas de capacidad y optimizar rendimiento total sin congestionar tráfico interactivo
Recuperación aumentada y búsqueda	Combina consulta, búsqueda y modelo; lee índices y objetos distribuidos	Coordinar fabric de cómputo, almacenamiento, bases vectoriales y ruta de acceso a datos

Estas descripciones son patrones, no especificaciones. La arquitectura concreta depende del modelo, software, tamaño de lote, paralelismo, sincronización, ubicación de datos y objetivos del cliente. El requerimiento de conectividad se escribe con extremos, cargas y criterios de éxito, no con el rótulo “red de IA”.

Anatomía funcional de una plataforma acelerada

Una AI Factory no se reduce a las GPU. CPU, aceleradores, memoria de alto ancho de banda, interfaces de red, DPU o SmartNIC, almacenamiento local, switches de escala, racks, potencia, refrigeración, firmware, bibliotecas, scheduler y observabilidad forman una cadena. La falla de una capa puede dejar las otras instaladas pero sin producir trabajo útil. El diseño integrado de AI y facility es el foco de marcos recientes de ASHRAE, PNNL, NEMA y OCP [31, 32].

Componente lógico	Función dentro de la carga	Interfaz de infraestructura que requiere atención
CPU y memoria del host	Coordinar proceso, datos, sistema operativo y runtime	Potencia, memoria, NUMA, gestión y disponibilidad de firmware
GPU, TPU u otro acelerador	Ejecutar kernels y paralelismo matricial	Potencia y refrigeración por rack, memoria y tolerancia térmica
HBM y memoria local	Mantener operandos y datos próximos al acelerador	Capacidad, ancho de banda, temperatura y errores de memoria
NIC, DPU y SmartNIC	Transferir tráfico y descargar funciones de red o seguridad	Puertos, ópticas, firmware, colas, telemetría y aislamiento
Almacenamiento local y compartido	Proveer conjuntos de datos, checkpoints y resultados	Throughput concurrente, latencia, redundancia y recuperación
Scheduler y runtime	Colocar trabajos, recuperar fallas y arbitrar capacidad	Estado del clúster, inventario, métricas y políticas de operación
Fabric y administración	Mover tráfico de escala y mantener control	Potencia, espacio, cableado, rutas diversas y zona de gestión

La potencia, el caudal hidráulico, el peso cargado, la altura y la ruta de servicio deben entrar en el paquete de aceptación del rack. El dueño fija un sobre por plataforma: condición típica y máxima, no solo un número anunciado. La integración de energía y refrigeración con la forma del rack puede cambiar el centro de gravedad, las bandejas, la disposición de puertos y el método seguro de retirar un equipo.

Planos de red dentro y fuera de la AI Factory

El plano de red se separa por función para aislar fallas, medir desempeño y administrar seguridad. La separación puede ser física, lógica o una combinación; lo importante es documentar la frontera y su comportamiento. El enfoque de red por capas aparece también en diseños abiertos de clústeres de IA [32].

Plano	Qué conecta	Métricas y criterios apropiados
Scale-up	Aceleradores dentro de un dominio de rack o sistema estrechamente acoplado	Ancho de banda, latencia, errores de enlace, capacidad ante pérdida de dispositivo
Scale-out	Nodos, filas y racks de un clúster	Goodput, bisection bandwidth, congestión, reintentos, balance y tiempo de finalización
Front-end	Usuarios, APIs, almacenamiento de entrada y aplicaciones de servicio	Latencia por percentil, disponibilidad, protección, filtrado y capacidad de pico
Storage fabric	Servidores, almacenamiento de entrenamiento y repositorios	Throughput agregado, latencia de lectura y escritura, cola, consistencia y recuperación
Out-of-band	Gestión de servidores, switches, energía y refrigeración	Acceso de emergencia, autenticación, trazabilidad y operación durante falla del plano de producción

Plano	Qué conecta	Métricas y criterios apropiados
DCI y salida exterior	Otros campus, regiones, cloud on-ramps, carriers e Internet	RTT por destino, capacidad contratada, pérdida, ruta, separación y capacidad restaurada

Un diagrama leaf-spine o Clos puede ofrecer caminos múltiples, pero el rendimiento depende de la relación de oversubscription, el tamaño y la gestión de colas, el equilibrio de flujos, el buffer, la congestión y el tráfico colectivo. Las operaciones all-reduce o all-gather sincronizan participantes; el rendimiento se puede limitar por el enlace más lento o la ruta más congestionada. El dimensionamiento usa el patrón medido o modelado de la aplicación y conserva capacidad para crecimiento, mantenimiento y contingencia.

RDMA ofrece movimiento de datos con menos intervención de la CPU cuando la plataforma y la aplicación lo aprovechan. RoCE transporta RDMA sobre Ethernet y requiere una estrategia coherente de control de congestión, QoS, buffers, telemetría y operación; las implementaciones de baja pérdida pueden ser sensibles a la congestión y a la interacción entre flujos. InfiniBand y las redes Ethernet de alto desempeño son opciones con ecosistemas, herramientas y prácticas distintos. La decisión compara interoperabilidad, soporte, habilidades operativas, coste total, plan de crecimiento y tolerancia a una falla. Ninguna etiqueta tecnológica reemplaza la prueba bajo carga representativa.

Del throughput al trabajo terminado

Una red puede cumplir velocidad nominal de puerto y aun así entregar poco trabajo útil si los aceleradores esperan a datos, si hay retrabajo de operaciones, si el almacenamiento no alimenta la carga o si un fallo obliga a reiniciar trabajos largos. La evaluación registra simultáneamente telemetría de compute, fabric, storage,

scheduler y facility, con relojes y etiquetas de tiempo correlacionados.

01	**Tiempo de finalización de trabajo**	QUÉ AYUDA A REVELAR Efecto agregado de cómputo, red, datos y reintentos
02	**Utilización de aceleradores**	QUÉ AYUDA A REVELAR Tiempo de cómputo frente a espera, carga y recuperación
03	**Goodput de fabric**	QUÉ AYUDA A REVELAR Tráfico útil después de pérdidas, retransmisiones y limitaciones
04	**Congestión y cola**	QUÉ AYUDA A REVELAR Incidencia de oversubscription, hotspots y patrones colectivos
05	**Errores y retransmisiones**	QUÉ AYUDA A REVELAR Calidad de enlaces, ópticas, cableado y configuración
06	**Rendimiento de storage**	QUÉ AYUDA A REVELAR Capacidad de entregar datos y guardar checkpoints
07	**Energía por trabajo útil**	QUÉ AYUDA A REVELAR Relación entre recursos consumidos y salida lograda
08	**Capacidad sobreviviente**	QUÉ AYUDA A REVELAR Jobs que continúan, reinician o migran bajo cada falla definida

Las métricas de tokens por segundo, tiempo al primer token o solicitudes por segundo se aplican a inferencia cuando representan la experiencia y el contrato. Para entrenamiento suelen importar

más tiempo de trabajo, rendimiento sostenido, estabilidad, reintentos y costo energético. El dueño de la aplicación define qué salida constituye valor y cómo se mide.

Frontera entre clúster, DCI y cliente

La fabric interna debe terminar en una frontera documentada antes de entrar al DCI o a redes de carriers. Training suele privilegiar capacidad de datos y puede tolerar más distancia al usuario; inferencia puede necesitar proximidad a una región o cliente; replicación puede mover grandes volúmenes entre campus y convivir con tráfico de aplicación. El diseño define qué datos cruzan la frontera, qué ruta usan, qué nivel de cifrado aplica, cómo se protege y cuánto tiempo de restauración acepta la misión.

El DCI no debe heredar automáticamente metas de un fabric de clúster. Distancia, equipos ópticos, dominios administrativos y forma de falla son diferentes. El contrato y el plan de pruebas especifican extremos y medidas independientes; el estudio de aplicación calcula la experiencia completa con el tramo de red, el procesamiento y el destino.

Ópticas y estrategia de crecimiento

El plan de capacidad debe indicar velocidad por puerto, cantidad de puertos, distancias, tipos de óptica, fibra requerida, reservas, compatibilidad y calendario de actualización. La migración de 400G a 800G u otras velocidades no es una sustitución aislada de transceptores: puede afectar presupuesto de potencia, gestión térmica, densidad de puertos, cableado y prácticas de mantenimiento. Los nombres comerciales y hojas de ruta cambian; cada fase debe validarse con equipos y especificaciones de interoperabilidad vigentes.

Interfaz con energía y refrigeración

La densidad de cómputo cambia el espacio disponible, la ruta de bandejas y la estrategia de enfriamiento. Las instalaciones con

refrigeración líquida deben permitir inspección y mantenimiento de manifolds y tuberías sin comprometer rutas de datos; las bandejas deben protegerse frente a humedad y accesos de servicio. Los equipos de red requieren potencia y refrigeración dentro de márgenes operacionales. Un plano coordinado evita que la expansión de una disciplina bloquee la otra.

Readiness de una AI Factory

Antes de confirmar una fase, el dueño cruza un modelo de cómputo con un modelo de facility y un modelo de red. El diseño no promete un número de aceleradores sin demostrar su alimentación, enfriamiento, almacenamiento, interconexión, scheduler y demanda. Una reunión de interfaz documenta cada dependencia y asigna a un responsable. Los marcos de diseño integrado recomiendan coordinar facilities, potencia, refrigeración y sistemas de cómputo desde la etapa de requisitos [31, 32].

01	**Carga**	DECISIÓN Y EVIDENCIA MÍNIMA Workload, horario, crecimiento, perfil de falla y métrica de resultado
02	**Cómputo**	DECISIÓN Y EVIDENCIA MÍNIMA Plataforma, potencia por rack, memoria, software, firmware y vida útil
03	**Fabric**	DECISIÓN Y EVIDENCIA MÍNIMA Planos de red, topología, oversubscription, ópticas, telemetría y prueba
04	**Storage**	DECISIÓN Y EVIDENCIA MÍNIMA Datos, velocidad de lectura/escritura, checkpoints y recuperación
05	**Facility**	DECISIÓN Y EVIDENCIA MÍNIMA MW por fase, distribución, envolvente térmica, agua y modos degradados

06	**Operación** DECISIÓN Y EVIDENCIA MÍNIMA Personal, versiones, procedimientos, inventario, repuestos y soporte
07	**Comercial** DECISIÓN Y EVIDENCIA MÍNIMA Cliente, precio, fechas, utilización objetivo, obligaciones y criterios de aceptación

Campus Horizonte | Diferenciar red de IA y salida exterior

Expediente hipotético H-11. Un bloque de 100 MW puede destinarse a cargas aceleradas, pero todavía no se especifican plataforma, densidad de racks, fabric, almacenamiento ni perfil de tráfico. Por tanto, el caso no promete cantidad de GPU ni ancho de banda de un clúster. La aceptación debe coordinar computación, energía, líquidos, red interna y enlaces externos con pruebas representativas de carga.

Preguntas de aplicación

1. ¿La red de la AI Factory permite que la carga complete el trabajo requerido dentro de los límites de energía, refrigeración y capacidad externa?
2. ¿Qué enlace o plano de red limita el rendimiento al perder un componente?
3. ¿Qué benchmark del trabajo, telemetría y prueba de falla definen el rendimiento?

Práctica de dominio

Trace por separado el tráfico este-oeste y norte-sur de una carga IA. Señale congestión, dominios de falla y métricas de aceptación.

Decisión de diseño. Solicite un modelo de tráfico por fase de la carga de IA. Separe front-end, almacenamiento, fabric de cómputo, administración y DCI; asigne desempeño, capacidad y política de contingencia a cada uno.

Parte V · Probar, operar y preservar valor

22. Resiliencia física y fallas compartidas

Objetivo del capítulo: detectar riesgos comunes y calcular qué carga sobrevive a fallas simultáneas o correlacionadas.

Redundancia no equivale a independencia

La parte de diseño ya distinguió las rutas físicas de los contratos. La revisión de resiliencia exige ahora cuantificar el efecto del fallo, no repetir el inventario: qué servicio y cuántos Gbit/s o MW sobreviven, durante cuánto tiempo, mediante qué conmutación y con qué impacto contractual. El análisis recorre un árbol de fallas desde el resultado hasta activos, controles y personas, incluidas las causas compartidas y los límites de reparación.

En telecomunicaciones, los grupos de enlaces con un riesgo compartido se describen como Shared Risk Link Groups (SRLG). El concepto ayuda a señalar enlaces que podrían fallar juntos por una causa física o lógica. Una declaración de SRLG no reemplaza la investigación del corredor, pero hace explícita una dependencia que de otro modo puede esconderse detrás de dos etiquetas comerciales.

Diversidad comercial y diversidad física

La diversidad comercial reduce concentración de proveedor y puede mejorar opciones de soporte, negociación y tecnología. La diversidad física reduce la posibilidad de que un evento común interrumpa los caminos. Una arquitectura madura identifica ambas y declara el nivel de protección que logra.

La deuda de resiliencia se acumula cuando cambia la ruta real

La arquitectura documentada y la ruta que hoy presta el servicio pueden dejar de coincidir. Un corte puede provocar un desvío temporal; una reparación puede cambiar empalmes o cámaras;

una migración de carrier, una venta de activos mayoristas o una nueva obra civil puede introducir otra dependencia. También puede cambiar el punto de entrada, el backhaul a una estación de amarre o el equipo que ejecuta la protección. El servicio sigue disponible y, sin embargo, su resiliencia declarada puede haber disminuido.

Cambio o evento	Supuesto que puede quedar obsoleto	Revalidación mínima
Corte y reparación de planta	La ruta restaurada coincide con el as-built anterior	Trazado actualizado, mediciones ópticas y revisión de A/B y SRLG
Desvío o migración mayorista	El proveedor conserva el mismo activo y operador de campo	Titularidad, ruta, terceros, demarcación y obligaciones de reparación
Cambio de carrier o punto de presencia	Dos servicios terminan en redes o edificios distintos	Mapa lógico y físico actualizado, capacidad y prueba de failover
Obra de carretera, puente o campus	El corredor no tiene nueva exposición ni acceso restringido	Inspección, permisos, calendario de obras y alternativa de intervención
Nuevo cross-connect o política de tráfico	Las rutas activas siguen separadas y usan la salida prevista	Revisión de configuración, inventario, trazado y medición extremo a extremo
Mantenimiento urgente	La intervención no afecta simultáneamente ambos caminos	Autorización, ventana, secuencia, rollback y verificación posterior

Por eso la revisión no busca culpables cuando una ruta cambia: reconstruye el estado actual del servicio. Se comparan tres versiones: **diseñada**, **instalada** y **activa**. Si difieren, se registra qué cambió, desde cuándo, quién lo confirmó, qué servicios dependen de ello y qué prueba cierra la brecha. Un desvío temporal sin fecha de expiración se convierte fácilmente en una arquitectura permanente que nadie ha aceptado formalmente.

Método de prueba de resiliencia de conectividad

La pregunta es cuánto del servicio contratado se mantiene tras cada escenario de falla, durante cuánto tiempo y con qué evidencia. El análisis recorre el trayecto de extremo a extremo y en ambas direcciones, desde el rack hasta las redes y destinos que necesita la aplicación. Incluye conectividad interna, MMR, entrada al edificio, rutas metropolitanas, carriers, puntos de intercambio, backbones y sistemas submarinos cuando forman parte del servicio.

Dominio	Qué se comprueba	Evidencia mínima
Geografía y planta externa	Separación de ductos, cámaras, puentes, túneles, costas y zonas de riesgo	Planos georreferenciados autorizados, recorrido e inventario de puntos comunes
Edificio y campus	Entradas, salas, bandejas, MMR, edificios y rutas de campus	As-built, demarcaciones, derechos de acceso y visita técnica
Proveedores y contratos	Quién posee, opera y repara cada tramo; qué protección promete el contrato	Matriz de operadores, SLA, escalamiento, restauración y responsabilidades
Red lógica	Direccionamiento, BGP, rutas, políticas, equipos, software y gestión	Configuración aprobada, análisis de dependencias, registros y prueba
Capacidad y rendimiento	Tráfico que sobrevive, congestión y experiencia de la aplicación	Throughput, pérdida, RTT, jitter, convergencia y servicio bajo carga
Operación y recuperación	Detección, comunicación, reparación, alternancia y retorno	Runbooks, contactos, repuestos, cronología y revisión posterior

El equipo acuerda primero los servicios prioritarios y criterios de aceptación. Luego dibuja cada camino, identifica activos y grupos de riesgo compartido, solicita evidencia a operadores, inspecciona rutas críticas y calcula la carga que recibe cada alternativa.

Finalmente realiza ejercicios seguros de pérdida de un enlace, carrier, sala, tramo terrestre o salida internacional; verifica conmutación y retorno; y mide el resultado extremo a extremo. Las pruebas se coordinan para proteger el tráfico productivo.

La ficha de resultado registra escenario, fecha, configuración, tráfico probado, servicio afectado, capacidad remanente, pérdida de paquetes, tiempo de detección, convergencia, recuperación funcional, reparación física, responsables, evidencia y brechas aceptadas. La revisión se repite después de cambios materiales y con la periodicidad definida por riesgo y contrato. Un inventario envejecido, una ruta que cambió o un acuerdo de restauración vencido generan deuda de resiliencia aunque no haya ocurrido una interrupción.



Figura 27. La convergencia oculta de dos contratos

El dibujo no prueba que exista una falla; muestra dónde investigar. La decisión puede aceptar un cruce común si la consecuencia es tolerable y existe una alternativa operacional. También puede justificar una obra adicional si la pérdida de ambos caminos supera el riesgo aceptado.

Capacidad sobreviviente

La pregunta de resiliencia no termina en “¿existe una ruta alterna?”. Debe responder cuánto tráfico puede transportar esa ruta cuando la principal se pierde. Si el camino alternativo tiene capacidad insuficiente, la red conserva una forma de conectividad, pero no el servicio completo. La capacidad sobreviviente se estima con la carga de contingencia, la política de tráfico, las prioridades, las restricciones de proveedor y el estado de los equipos.

Una comparación didáctica puede presentar tres caminos internacionales de 100 Gbit/s con RTT estimados de 138, 148 y 127 ms. El camino de 138 ms supera en 11 ms al de menor RTT y el de 148 ms en 21 ms. Estas diferencias ayudan a formular una hipótesis de rendimiento; no prueban que las rutas sean física ni operacionalmente independientes. Antes de aprobarlas se identifican entradas, ductos, cruces, PoP, titulares, backhaul, puntos de reparación y capacidad superviviente; después se mide cada camino con la misma metodología. En una decisión real, los números del ejercicio se sustituyen por trazados y mediciones del servicio ofertado.

El escenario debe contemplar operación degradada. ¿Qué aplicaciones continúan? ¿Qué tráfico se descarta o limita? ¿Se priorizan consultas interactivas frente a replicación? ¿Cuánto tiempo puede mantenerse el modo de contingencia? ¿Qué evidencia activa el retorno a la normalidad? La respuesta pertenece a negocio, ingeniería y operación en conjunto.

Riesgo y costo

La resiliencia cuesta capital y operación. El riesgo se evalúa con probabilidad, impacto, tiempo de interrupción, clientes afectados, costo de reparación y capacidad alternativa. Se pueden priorizar mitigaciones sin pretender que toda falla se puede eliminar.

Dominios de falla que atraviesan distintas disciplinas

El análisis de causa común conecta instalaciones, transporte y servicio. Dos proveedores pueden arrendar ductos del mismo dueño; dos circuitos pueden entrar por cámaras contiguas; dos sistemas submarinos pueden compartir estación de amarre y backhaul; dos buses eléctricos pueden depender de la misma protección o sistema de control. Las dependencias pueden estar documentadas en contratos, pero también aparecer durante una inspección o un incidente.

Dominio	Ejemplo de causa común	Evidencia para revisar
Territorio y acceso	Inundación, incendio, sismo, corte de puente o bloqueo de una ruta	Estudios de amenaza, recorridos y plan de acceso alterno
Energía aguas arriba	Subestación, transformador, barra o esquema de protección compartidos	Unifilares, estudios de red, pruebas y límites de carga
Campus y edificio	Un duct bank, sala, riser, bandeja o punto de entrada compartido	Planos, inspección, as-built y gestión de obras
Carrier y planta exterior	Ducto mayorista, cámara, poste, cruce, PoP o equipo compartido	Trazado físico, contrato y declaración de SRLG
Cable internacional	Landing station, backhaul terrestre, zona de riesgo marina o sistema de restauración común	Mapa de ruta aprobado, operador, capacidad y acuerdo de reparación
Control y operación	BMS, EPMS, DCIM, autenticación, scheduler o cambio simultáneo	Arquitectura, dependencias lógicas, acceso de emergencia y pruebas
Equipo y supply chain	Repuestos, firmware, combustible o soporte de un único fabricante	Inventario, alternativas, SLA de repuesto y plan de sustitución

Los ensayos deben priorizar escenarios de alto impacto y plausibilidad operacional. No se cortan rutas ni se maniobra potencia en producción sin análisis, autorización, ventana y criterio de aborto. Cuando una dependencia no puede probarse directamente, el informe declara la limitación, la fuente sustituta y el riesgo residual que acepta una persona con autoridad.

Una matriz útil registra evento, activos afectados, servicio impactado, duración probable, capacidad que permanece, detección, ruta de recuperación, dueño del control, prueba ejecutada y aprobación de riesgo residual. No debe confundirse un ejercicio de mesa con una prueba de conmutación real; ambos responden preguntas distintas.

Auditoría de dominios comunes y capacidad que sobrevive

La independencia física se evalúa por evento y por servicio: si una causa común puede retirar a la vez ambos caminos, la segunda etiqueta comercial no aporta esa protección. La revisión registra qué capacidad y funciones continúan, por cuánto tiempo, con qué rendimiento y con qué condiciones de contrato. Los dominios de la tabla son una guía de investigación; la arquitectura de cada sitio determinará qué otros elementos deben añadirse.

Dominio de falla	Posible causa compartida	Qué comprobar	Consecuencia que debe traducirse
Edificio y campus	Entrada, duct bank, riser, bandeja, sala o MMR compartidos	As-built, visita, demarcaciones y rutas internas	MW o servicios que dejan de llegar al cliente
Territorio	Puente, carretera, zona de inundación o incendio, acceso vial u obra común	Coordenadas, permisos, inspección, amenaza y acceso de reparación	Duración de la interrupción y demora de reparación

Dominio de falla	Posible causa compartida	Qué comprobar	Consecuencia que debe traducirse
Transporte	Ducto mayorista, poste, fibra, backhaul, landing station o corredor común	Titular, operador, trazado, SRLG, reparación y capacidad	Capacidad sobreviviente, latencia, congestión y pérdida contractual
Interconexión	PoP, carrier hotel, cross-connect, IX, salida cloud o equipo terminal compartido	MMR, topología lógica, punto de terminación y prueba de failover	Servicios/destinos aislados aunque la fibra siga encendida
Relación comercial	Dos marcas dependen del mismo mayorista, subcontratista, acuerdo de reparación o entidad controladora	Cadena de suministro, propietario, contrato, SLA y escalamiento	Concentración, derechos de reparación y exposición a una sola contraparte
Operación	NOC, técnicos, credenciales, gestión de cambios, repuestos, DCIM/BMS/EPMS compartidos	RACI, turnos, acceso de emergencia, runbooks y ejercicios	Tiempos de detección y recuperación, costo de personal y riesgo de error común
Energía y control	Subestación, barra, protección, combustible, control o punto de conexión común	Unifilares, estudios, autonomía, pruebas y dependencia de control	MW IT disponibles durante la contingencia, duración y costo de contingencia

La auditoría repite la evaluación para condiciones normal, mantenimiento y contingencia pertinentes al contrato. El resultado puede ser una reducción de capacidad, una ruta más lenta, una restauración más larga o una restricción de operación; cada salida tiene un impacto económico distinto. Se declara la evidencia

ausente y se evita asignar probabilidades de falla sin datos del sitio o una base técnicamente defendible.

En el informe, la diversidad comercial y la física se muestran por separado. Una obligación contractual de restauración tampoco equivale a una ruta independiente: indica una respuesta pactada, que debe comprobarse frente al trazado, la capacidad disponible, los tiempos y las dependencias del proveedor.

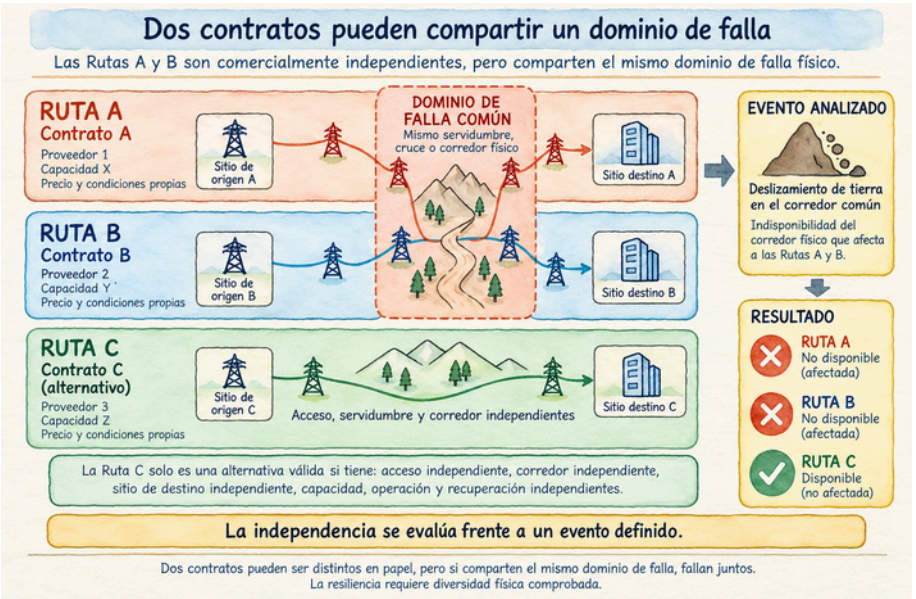


Figura 28. Dos contratos pueden compartir un dominio de falla

Lectura. Las rutas A y B del esquema son comercialmente separadas, pero el cruce común deja a ambas expuestas al mismo evento. La ruta C solo es una alternativa real si sus accesos, corredores, capacidad, extremo remoto, operación y tiempos de recuperación sobreviven al escenario analizado. La independencia se evalúa frente a un evento definido.

Impacto funcional y costo de una falla

Un enlace en estado *up* puede entregar un servicio degradado. Para el usuario importa si la aplicación cumple su objetivo de disponibilidad y desempeño, no solo si una interfaz mantiene portadora. La evaluación distingue interrupción completa,

conmutación, pérdida o jitter fuera de objetivo, saturación en contingencia y recuperación parcial.

El costo se estima por clase de servicio y por evento. El cálculo combina la actividad que no pudo completarse, el costo incremental de operar en modo degradado y el trabajo directo de recuperación. Si existen créditos contractuales, se registran por separado: reducen una factura, pero no necesariamente compensan la pérdida operativa. Cada supuesto económico debe tener una fuente, un responsable y una validación del dueño del proceso; el costo por minuto no se generaliza entre aplicaciones.

Tipo de evento	Qué puede observar el usuario	Evidencia que debe reunirse
Microcorte o conmutación	Reintentos, sesión interrumpida o transacción repetida	Inicio y fin, pérdida de paquetes, tiempo de failover y resultado de aplicación
Degradación	Respuesta lenta o tareas que no alcanzan su objetivo	RTT, jitter, pérdida, carga, duración y volumen de operaciones afectadas
Pérdida de una ruta	Servicio mantenido con menor capacidad o prioridad	Ruta caída, capacidad sobreviviente, tráfico descartado y restricciones activadas
Interrupción total	Función no disponible hasta recuperar el servicio	Detección, recuperación funcional, reparación física, comunicaciones y costo directo

En el registro del evento se separan cuatro tiempos: detección, conmutación o contención, recuperación de la función y reparación física. El objetivo de tiempo de recuperación (RTO) define el límite acordado para restablecer la función; el tiempo de reparación física no equivale a ese objetivo. Una ruta puede tardar en repararse mientras la aplicación continúa en modo degradado; también

puede ocurrir lo contrario si la alternativa no tiene capacidad suficiente.

Mantenimiento y ventanas de cambio

La arquitectura debe ser mantenible sin interrumpir el servicio que promete proteger. Se comprueba que un técnico puede acceder al cable, identificarlo, aislarlo y trabajar en él sin poner en riesgo las dos rutas. Los cambios se diseñan con precondiciones, impacto, ventana, responsables, rollback y pruebas posteriores. La conectividad redundante no protege frente a una intervención que desconecta simultáneamente ambos caminos por error.

Campus Horizonte | Una contingencia debe convertirse en cifra

Expediente hipotético H-12. Supóngase que A y B comparten un cruce vial: una misma excavación podría cortar ambas rutas. Una tercera ruta solo cambia esa exposición si se verifica independencia del cruce y si dispone de capacidad de restauración suficiente. La matriz de incidentes debe registrar tráfico previo, tráfico sobreviviente, duración, RTT, costo operacional, créditos contractuales y responsable.

El resultado no es asignar una probabilidad inventada, sino declarar la condición que debe superarse antes de aceptar el riesgo de un cliente concreto.

Preguntas de aplicación

1. ¿Qué capacidad de servicio queda después de perder el dominio común más probable, y qué prueba valida que la recuperación funciona bajo carga?
2. ¿Qué activo común reduce la capacidad sobreviviente cuando coinciden dos fallas?
3. ¿Qué análisis de dependencias y ensayo con carga prueban la resiliencia reclamada?

Práctica de dominio

Elija un incidente de energía y otro de fibra. Identifique causas comunes, servicios afectados, capacidad sobreviviente y evidencia de recuperación.

Decisión de diseño. Exija una lista de dependencias comunes y un escenario de capacidad sobreviviente. Dos rutas no representan resiliencia plena hasta que se sabe qué falla, qué tráfico sigue pasando y cuánto tiempo se requiere para recuperar.

23. Latencia y desempeño como variables de negocio

Objetivo del capítulo: relacionar latencia y desempeño con geografía, experiencia del cliente y economía del servicio.

Del milisegundo a la decisión de ubicación

La economía de la latencia comienza con una hipótesis concreta. ¿Qué decisión se acelera? ¿Qué recurso espera? ¿Cuántas interacciones secuenciales hay? ¿Qué parte del tiempo es red, procesamiento local, consulta a sistemas, cola o respuesta humana? Reducir RTT no crea valor por sí solo; lo crea cuando aumenta transacciones completadas, continuidad, productividad, utilización de cómputo, seguridad o calidad de servicio.

Un ejemplo industrial puede involucrar una cámara, una aplicación de visión, una consulta a un modelo, una alerta y una orden de control. Si la decisión debe ejecutarse cerca del proceso, mover inferencia a un nodo regional o edge puede reducir dependencias de larga distancia. Si el modelo se actualiza en una región central y la respuesta no es crítica, el centro de datos hyperscale puede ser más eficiente. La arquitectura es jerárquica: edge para respuesta local, región para datos y contexto, hyperscale para entrenamiento o servicios de gran escala. Ningún patrón es universal.

Cálculo de tiempo de ida y vuelta

La ruta más corta geográficamente no siempre es la más corta ópticamente. Los cables siguen derechos de vía, puentes, ductos, servidumbres, estaciones de amarre y redes instaladas en etapas distintas. La estimación usa longitud de ruta probable, equipos y medición real. Una oferta debe separar latencia teórica de latencia medida y declarar percentil, destino, ventana, sentido y carga.

La latencia de cola puede aumentar cuando el enlace opera cerca de la saturación, cuando varias clases compiten por la misma salida o cuando una ruta de respaldo concentra tráfico. La capacidad se planifica en estado normal y contingencia. Los percentiles extremos ayudan a observar comportamientos que el promedio esconde, pero necesitan intervalos suficientes y contexto de carga.

Inventario de ruta y presupuesto auditable de latencia

Un valor de RTT solo es comparable cuando se conocen los extremos, el método y la versión de la ruta. El inventario descompone el recorrido en tramos físicos y transiciones de servicio, asigna un dueño a cada tramo y vincula cada estimación o medición con su evidencia. Así se puede revisar qué parte corresponde a propagación, equipos, conmutación, colas o procesamiento fuera de la red.

Registro	Campos mínimos	Evidencia de referencia
Extremos y versión	Servicio, origen, destino, demarcaciones, ID y versión de ruta	Diagrama aprobado, inventario de circuitos y fecha de actualización
Tramos	Inicio y fin, medio, titular, operador, tercero, PoP o handoff y longitud	Trazado disponible, ficha del operador, contrato o levantamiento
Perfil de medición	Protocolo, sentido, tamaño de paquete, clase, carga, ventana e intervalo	Configuración de prueba, reloj sincronizado y ubicación de agentes
Resultado	RTT por percentil, pérdida, jitter, disponibilidad y capacidad bajo contingencia	Datos originales, resumen reproducible, alarmas y condiciones de prueba
Calidad de evidencia	Fuente, fecha, método, incertidumbre, supuestos, responsable y vigencia	Registro de aprobación, excepciones y próximo evento de revalidación

La lectura de las cifras sigue una jerarquía. Un piso de propagación estima el límite físico bajo supuestos explícitos; no describe por sí solo el servicio. Un diseño de ruta añade longitud probable, equipos y puntos de intercambio, pero continúa siendo una estimación. Un objetivo contractual define una obligación dentro de una demarcación y un método acordados. Una campaña de medición describe el comportamiento observado durante una ventana concreta. Una prueba de contingencia acredita el comportamiento ante el evento ensayado, no ante todas las fallas posibles.

No se debe atribuir a la fibra una demora que proviene de colas, política de tráfico o procesamiento, ni convertir una medición de una ruta en una garantía para otra versión. Los percentiles se presentan con ventana, número de muestras, carga y ruta; una cifra sin esos datos puede dar una precisión aparente que la evidencia no sostiene.

Un inventario de referencia necesita mostrar la distribución, no solo una cifra central. La tabla siguiente es un **ejemplo didáctico de datos de diseño**, no una campaña de medición ni una oferta de carrier. No especifica origen, trazado, carga, método, número de muestras ni ventana; por tanto, no debe usarse para elegir ubicación, prometer desempeño o comparar operadores. En una due diligence se reemplaza cada fila por datos reproducibles obtenidos entre extremos identificados.

Destino de ejemplo	RTT p50	RTT p95	RTT p99	Jitter	Pérdida
Región A	124 ms	132 ms	141 ms	0,8 ms	0,01 %
Región B	138 ms	147 ms	155 ms	1,1 ms	0,02 %
Región C	134 ms	143 ms	152 ms	1,0 ms	0,02 %
Región D	127 ms	135 ms	144 ms	0,9 ms	0,01 %
Región E	52 ms	58 ms	66 ms	0,5 ms	0,01 %
Región F	158 ms	170 ms	185 ms	1,5 ms	0,03 %

El p50 describe el centro de la distribución; el p95 y el p99 revelan la cola y son útiles para aplicaciones que necesitan consistencia. El jitter indica variación temporal, pero el lector debe saber si se calcula sobre paquetes, intervalos y dirección concretos. La pérdida puede ser baja en promedio y concentrarse en ráfagas. El inventario debe guardar los datos originales, reloj y sincronización, tamaño de muestra, agentes, clase de servicio, topología vigente, volumen de tráfico y eventos de cambio. Así puede observar si mejora el servicio, detectar una degradación, administrar excepciones y demostrar el resultado al cliente.

11 ms en un campus de 500 MW primero identifica qué espera

Una variación de 11 ms no tiene un precio universal. La potencia total del campus tampoco convierte automáticamente esa latencia en energía desperdiciada. El efecto depende de cuántas dependencias de red atraviesa una operación, si ocurren en serie o en paralelo, si el programa puede solaparlas con cómputo y qué trabajo queda detenido cuando la respuesta tarda. Un campus de 500 MW puede albergar cargas con sensibilidades muy distintas.

Carga	Dónde puede importar la latencia WAN	Qué debe medirse antes de atribuir impacto
Aplicación empresarial con servicios remotos	Varias consultas secuenciales a identidad, base de datos, API o nube	RTT por llamada, llamadas en serie, caché, tiempo de servidor y porcentaje de solicitudes afectadas
Inferencia en línea	Consultas a recuperación de contexto, filtros, modelo o servicios auxiliares	Tiempo de usuario completo, llamadas secuenciales/paralelas, tokens, tasa de abandono y capacidad de cómputo
Entrenamiento local en un único campus	Principalmente importación de datos, checkpoint, gestión y coordinación externa	Qué tráfico sale del campus y si afecta el paso de entrenamiento; el RTT WAN no debe atribuirse al fabric interno

Carga	Dónde puede importar la latencia WAN	Qué debe medirse antes de atribuir impacto
Entrenamiento distribuido entre sitios	Barreras, sincronización y comunicación entre participantes	RTT de la ruta DCI, protocolo colectivo, cómputo solapado, stragglers, throughput y tiempo de paso

Para una cadena serial, la aproximación inicial es `ΔT = N × n × ΔRTT`, donde `N` es el número de transacciones o pasos, `n` el número de dependencias WAN seriales por unidad y `ΔRTT` el cambio de RTT. Cinco dependencias seriales expuestas a 11 ms suman hasta 55 ms de espera de red por operación. Si las consultas son paralelas, el tiempo adicional se aproxima al de la rama crítica más lenta, no a la suma de todas; si el cliente oculta la espera con ejecución asíncrona, la demora visible puede ser menor.

Un escenario de entrenamiento permite revisar el cálculo. Supóngase, solo para modelar, 1 millón de pasos por campaña, ocho sincronizaciones WAN realmente seriales por paso y 11 ms atribuibles a cada una. La demora acumulada de red sería `1.000.000 × 8 × 0,011 s = 88.000 s`, es decir, 24,44 horas por campaña. Catorce campañas equivaldrían a 342,22 horas anuales. Ese resultado es tiempo de pared potencial bajo los supuestos indicados; no prueba por sí solo 342 horas de GPU ociosa. La superposición con cómputo, el paralelismo de comunicaciones, la planificación de otras tareas y los mecanismos de recuperación pueden reducir o transformar el efecto.

Solo después de medir la potencia promedio que permanece energizada durante la espera se estima una equivalencia energética: `E_equiv = P_espera_medida × T_espera_no_solapada`. Si el grupo afectado consume en promedio 60 MW durante esas 342,22 horas no solapadas, la equivalencia es aproximadamente 20,53 GWh. El ejemplo no aplica los 500 MW del campus; tampoco demuestra que toda esa energía se pueda evitar. Para hablar de ahorro se mide una intervención que reduzca consumo eléctrico

real. Para hablar de productividad se mide trabajo terminado por hora, utilización, duración de entrenamiento, colas y costo de oportunidad. No se suman como beneficios separados resultados que describen el mismo efecto.

El costo eléctrico, si corresponde, se calcula con la tarifa efectiva del intervalo y de la frontera medida. El valor de negocio se modela por separado: transacciones completadas, tiempo de respuesta, horas de acelerador que de verdad dejan de bloquear trabajo útil, penalizaciones o continuidad. La inversión en una ruta de menor latencia debe validarse con una prueba A/B o una campaña controlada antes de convertirse en ahorro anual o promesa comercial.

Un caso económico transparente

Considere una organización que espera que 1.000 usuarios adopten asistentes de IA. En vez de anunciar un ahorro monetario fijo, el análisis crea escenarios y declara supuestos: usuarios activos diarios, interacciones por usuario, tiempo de espera, porcentaje de tareas completadas, costo de operación, valor horario y cambio de adopción al mejorar la respuesta. Se prueban al menos tres situaciones: conservadora, central y alta.

El beneficio potencial puede venir de más tareas terminadas, menor espera, mayor utilización de aceleradores, menos reintentos, menor tráfico de larga distancia o mejor continuidad de operación. Cada elemento debe evitar doble conteo. Si el modelo ya valora el tiempo ahorrado, no se suma nuevamente como productividad equivalente sin verificar que se transformó en capacidad o resultado económico.

Una estimación de inversión compara infraestructura regional, enlaces, interconexión y operación con el valor incremental que se espera capturar. El análisis es sensible a la adopción de usuarios, el patrón de solicitudes, la disponibilidad del modelo, el costo de transferencia y la ubicación de datos. La recomendación es medir

una prueba piloto antes de convertir una estimación en caso de negocio aprobado.

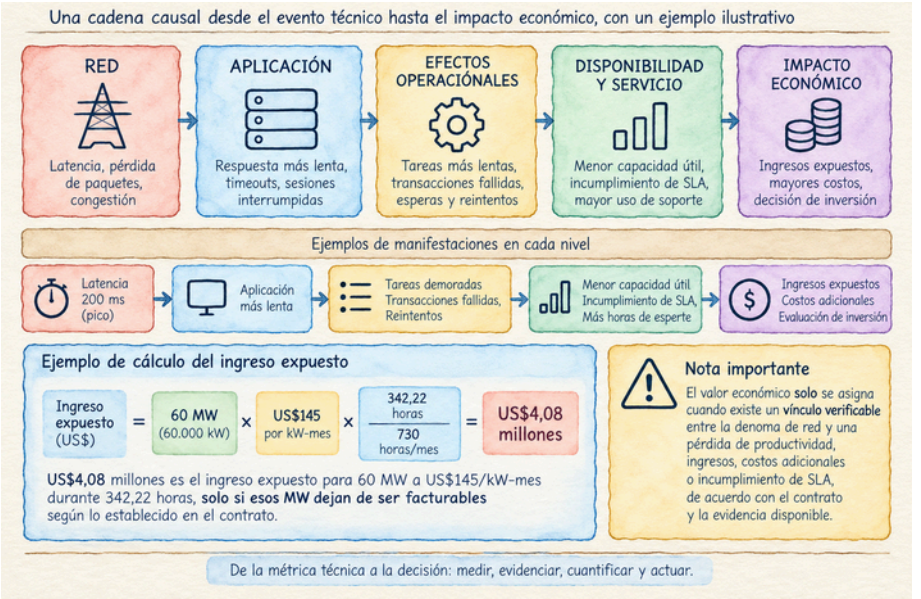


Figura 29. De la demora de red a una hipótesis económica

Lectura. El efecto de la latencia se mide en la aplicación y su carga: tareas, transacciones, espera, reintentos o capacidad útil. Solo se asigna valor cuando existe un vínculo verificable con productividad, ingresos, consumo o SLA. El valor de US$4,08 millones prorratea 60 MW a US$145/kW-mes durante 342,22 horas; solo representa ingreso expuesto si esos MW dejan de ser facturables según el contrato. No es costo eléctrico, penalidad automática ni ahorro garantizado.

Red y estrategia de localización

La pregunta de ubicación no es simplemente “¿edge o nube?”. Hay que asignar funciones: almacenamiento primario, inferencia, entrenamiento, recuperación de documentos, seguridad, identidad, registro y control. Cada componente tiene un requisito distinto de latencia, soberanía, capacidad y disponibilidad. Después se seleccionan rutas y puntos de interconexión que soporten esos requisitos.

Un sitio cercano a usuarios puede no tener los operadores o la potencia necesarios. Un campus central puede tener una gran red

pero mayor latencia hacia una planta remota. Un nodo regional puede actuar como punto intermedio, agregando tráfico y manteniendo datos relevantes cerca. La evaluación combina geografía óptica, datos, potencia, permisos, operación local y conectividad real.

Preguntas de aplicación

1. ¿Qué efecto comercial tiene cada milisegundo en esta aplicación, y qué datos permiten relacionar una mejora de latencia con ingresos o costo?
2. ¿Qué costo o compromiso comercial cambia si la aplicación responde más lentamente?
3. ¿Qué medición desde el usuario y serie comparable relacionan red y experiencia?

Práctica de dominio

Compare dos ubicaciones para una aplicación sensible al tiempo. Explique qué mide, qué no demuestra y cómo cambia la decisión comercial.

Decisión de diseño. Para cada inversión que prometa reducir latencia, declare el mecanismo técnico, el cambio operacional esperado y la variable económica que lo mide. Si no se puede formular esa cadena causal, primero diseñe una prueba de medición.

24. Commissioning: convertir el diseño en evidencia

Objetivo del capítulo: construir una secuencia de commissioning con condiciones previas y resultados reproducibles.

La aceptación empieza antes de la prueba

La puesta en servicio no se improvisa la semana de entrega. El plan de pruebas nace de los requisitos y de la arquitectura aprobada. Cada prueba debe tener objetivo, método, instrumento, condición de éxito, evidencia, responsables, precondiciones, seguridad, impacto y manejo de desviaciones. Un resultado “pass” sin dato reproducible no es evidencia suficiente para operar.

La aceptación se organiza por capas y después de extremo a extremo. Primero se verifica la obra civil y el cableado; luego la capa óptica; después la conexión lógica y los servicios; finalmente el comportamiento de la aplicación bajo condiciones normales y de falla. El método permite localizar la causa sin confundir una óptica degradada con una política BGP o una ruta congestionada.



Figura 30. Ciclo de commissioning y transferencia a operación

Lectura. La secuencia une requisitos, interfaces, construcción, pruebas, transferencia y operación. El cierre requiere resultados reproducibles, riesgos aceptados, documentación conforme a obra y un responsable operativo habilitado.

Secuencia de commissioning para infraestructura digital

El commissioning se construye desde requisitos y desde interfaces, con condiciones de entrada y salida definidas por contrato. En un centro con IA, un sistema puede pasar la prueba de facility y fallar la productividad del clúster; la aceptación debe unir ambas vistas en pruebas que el riesgo permita.

Etapa	Alcance	Evidencia para liberar la siguiente etapa
Revisión de diseño	Requisitos, interfaces, mantenibilidad, modos de falla y criterios de aceptación	Matriz de requisitos y observaciones cerradas

Etapa	Alcance	Evidencia para liberar la siguiente etapa
FAT	Equipos y controles probados por fabricante cuando corresponde	Protocolos, límites, configuración y pendientes
Inspección de recepción	Daño, seriales, accesorios, versión y condiciones de almacenamiento	Inventario, inspección y desviaciones
Precomisionamiento	Continuidad, limpieza, aislamiento, calibración y preparación de sistemas	Checklists firmados, instrumentos y límites
SAT funcional	Sistemas instalados bajo sus modos normales y de mantenimiento	Tendencias, alarmas, capacidad y secuencias
Prueba integrada	Interacción entre utility, UPS, generadores, BESS, enfriamiento, redes y controles	Cronología sincronizada y servicio sobreviviente
Prueba bajo carga	Rendimiento con carga representativa y modo de contingencia aprobado	Valores, límites, carga, percentiles y aprobación
Transferencia operativa	Procedimientos, formación, repuestos, accesos y responsabilidades	Acta, inventarios y riesgos aceptados

Matriz mínima de pruebas

Capa	Prueba	Evidencia de cierre
OSP y entrada	Ruta, ductos, cámaras, entradas y separación	As-built validado e inspección de campo
Fibra	Continuidad, pérdida, reflectancia y OTDR	Informes completos y trazas nativas

Capa	Prueba	Evidencia de cierre
MMR	ODF, puerto, cross-connect y demarcación	Registro de puertos y recorrido físico
Servicio	RTT, pérdida, jitter, throughput y SLA	Datos con extremos, método y ventana
Resiliencia	Corte controlado, failover y recuperación	Cronología, tráfico perdido y tiempos
Operación	Alarmas, escalamiento, acceso y rollback	Prueba de procedimiento y contactos

Pruebas físicas

La inspección confirma que rutas, sellos, protecciones, etiquetas, terminaciones y separaciones se instalaron como fue aprobado. Se comparan as-built y obra ejecutada. Se comprueba accesibilidad, reserva de fibra, radios de curvatura, paneles, puntos de cruce y capacidad de crecimiento. La inspección debe probar que A y B conservan su separación, no solo que cada plano se ve limpio.

Para fibra se establece una línea base de pérdida y reflectancia y se conservan trazas OTDR en archivos nativos. Se documentan extremos, longitud de onda, instrumento, configuración, fecha, técnico y calibración. Las discrepancias se registran con severidad, impacto, dueño y fecha de cierre.

Pruebas funcionales

Los servicios se prueban desde los puntos que importan al usuario. Se mide el RTT, percentiles, pérdida y rendimiento de aplicación con tráfico representativo. En enlaces de alta capacidad se valida la metodología para demostrar throughput, ya que las limitaciones del generador, el host o el protocolo pueden falsear el resultado. Se mide bajo carga concurrente y con colas cuando sea parte del uso previsto.

La prueba de failover debe confirmar qué ruta se perdió, qué mecanismo reaccionó, cuánto tiempo pasó, cuántos paquetes se perdieron, qué capacidad quedó y si las aplicaciones siguieron entregando la función. El ensayo tiene un plan aprobado y una condición de abortar. También se valida que el camino de retorno no causa oscilación ni vuelve a la ruta fallada antes de que esté estable.

Pruebas de resiliencia y operación integrada

Los ejercicios pueden ser de mesa, simulación, corte controlado o mantenimiento en vivo. El alcance se elige según el riesgo. Una prueba de conmutación de un puerto no acredita la independencia de la ruta exterior; para demostrarla se requiere incluir las dependencias pertinentes o justificar otra forma de evidencia. Para BESS, la aceptación verifica secuencia, límites, controles, alarmas y el modo de conexión que se contrató. Para refrigeración líquida, se valida caudal, presión, CDU, pérdida de bomba, alarmas y aislamiento seguro según los límites del fabricante.

En una AI Factory, la prueba integrada puede observar si un trabajo de tamaño representativo sigue, se migra, reintenta o se pierde ante la falla seleccionada de un enlace, switch, nodo de almacenamiento, alimentación, CDU o scheduler. Se registra no solo qué equipo siguió encendido, sino la función de negocio que se mantuvo y cuánto tomó volver a una condición estable. La prueba se hace en un entorno de staging o durante una ventana aprobada; un experimento no autorizado sobre producción no es commissioning.

El paquete de aceptación reúne planos, inventarios, rutas, contratos, resultados de pruebas, licencias, configuración, procedimientos, contactos, excepciones y riesgos abiertos. La transferencia a operación se completa cuando el equipo que recibe el sistema sabe ubicar el activo, revisar su estado, ejecutar un cambio seguro y escalar una falla.

Campus Horizonte | Pruebas integradas para aceptar 100 MW IT

Expediente hipotético H-13. Antes de la primera entrega, la matriz de commissioning verifica con testigos y umbrales aprobados: transferencia entre fuentes eléctricas, autonomía, suministro térmico a carga representativa, fallas de bombas/CDU, alarmas y seguridad, pérdida de ruta de conectividad, capacidad sobreviviente y retorno seguro a estado normal.

Un certificado FAT individual, una fibra certificada o la firma de un contrato no sustituyen el ensayo integrado del servicio. La aceptación termina con acta, pendientes críticos resueltos, as-built, procedimientos y responsable operativo.

Preguntas de aplicación

1. ¿Qué pruebas de commissioning demuestran el desempeño integrado, la transferencia a operaciones y la recuperación antes de aceptar el sistema?
2. ¿Qué prueba de falla demostraría que la recuperación funciona con la carga representativa?
3. ¿Qué protocolo aprobado, resultado y acta autorizan la aceptación del sistema?

Práctica de dominio

Defina una prueba integrada con condiciones, secuencia segura, criterio medible, evidencia persistente y responsable de recepción.

25. Dirigir y operar el centro de datos conectado

Objetivo del capítulo: dirigir el centro como un sistema de servicio y conectar capacidad, clientes, facility, conectividad, finanzas, seguridad y personas mediante decisiones con evidencia.

El director responde por el sistema, las personas y la entrega operacional

El título del cargo cambia entre propietarios, operadores, campus, regiones y modelos comerciales. En una empresa puede abarcar un solo sitio; en otra, una cartera regional o una función específica de operaciones, ingeniería o facility. El mandato, el perímetro de decisión y las delegaciones deben quedar escritos. Como referencia de la práctica publicada, los puestos de operación de centros de datos incluyen gestión de equipos y turnos, métricas, incidentes, procedimientos, experiencia del cliente, seguridad y disponibilidad; ANSI/BICSI 009-2024 recoge prácticas de operación para entornos que van desde instalaciones empresariales hasta campus hyperscale y colocation [22, 60]. Ninguna descripción laboral es una regla universal: el alcance real depende del contrato, el tamaño, la estructura y el riesgo aceptado.

Dirigir no significa ser el especialista más profundo en todos los sistemas ni aprobar maniobras para las que no se tiene autorización. Significa asegurar que cada resultado tenga un dueño competente, que la decisión use evidencia vigente, que el riesgo residual esté aceptado por quien corresponde y que la organización cuente con recursos para cumplir sus compromisos. El director integra la responsabilidad; los responsables técnicos mantienen la autoridad profesional de su disciplina.

Resultado que debe proteger	Responsabilidad de dirección	Evidencia que permite decidir
Cliente y servicio	Alinear producto, capacidad, fecha, SLA, comunicaciones y recuperación con lo que la operación puede sostener	Contrato, SLO, calendario de aceptación, créditos aplicables y registro de compromisos
Capacidad y expansión	Mantener una sola lectura de MW por fase: anunciados, autorizados, energizados, utilizables, contratados y facturables	Balance de capacidad con frontera, fecha, redundancia, estado de obra y dueño de cada dato
Energía y facility	Garantizar que potencia, UPS, generadores, distribución, refrigeración, agua y controles operen dentro de las condiciones aprobadas	Unifilares, tendencias, pruebas, restricciones de la empresa eléctrica, mantenimiento y commissioning
Conectividad y plataformas	Asegurar que la arquitectura atienda las cargas del cliente y que la redundancia física sobreviva al escenario definido	Trazados, acuerdos de uso, dominios comunes, mediciones, capacidad sobreviviente y pruebas de failover
Finanzas y contratos	Controlar presupuesto, CAPEX, OPEX, costo energético, márgenes, facturación, caja, concentración y obligaciones de proveedores	Modelo financiero por fase, forecast, facturas, contratos, órdenes de cambio y análisis de variaciones
Seguridad y cumplimiento	Proteger a trabajadores, clientes, activos y datos; mantener autoridad para detener trabajo inseguro	Permisos de trabajo, auditorías, accesos, controles de seguridad, incidentes y obligaciones locales

Resultado que debe proteger	Responsabilidad de dirección	Evidencia que permite decidir
Personas y proveedores	Mantener cobertura 24/7, competencias, suplencias, condiciones de trabajo, repuestos y capacidad de respuesta	Roster, habilitaciones, formación, carga de turnos, contratos, inventario crítico y desempeño de proveedor
Construcción y transferencia	Aceptar el activo solo cuando pruebas, documentación, personal, repuestos y procedimientos estén listos	Paquete de commissioning, defectos abiertos, as-built, entrenamiento, manuales y aceptación operacional

El director define quién propone, quién revisa, quién aprueba, quién ejecuta y quién puede detener la actividad. Una matriz RACI sin autoridad de parada ni escalamiento de riesgo es insuficiente. En sistemas eléctricos, térmicos, contra incendio, de seguridad física, ciberseguridad y telecomunicaciones, la persona designada para la disciplina debe poder documentar una objeción técnica y activar el proceso de escalamiento.

El tablero del director integra operación, personas y readiness

Una cifra solo sirve para decidir si conserva su definición. Cada indicador debe declarar unidad, denominador, frontera, periodo, fuente, responsable, tolerancia, tendencia, fecha de actualización y acción al desviarse. Los objetivos se fijan a partir del diseño, los contratos, la ley local, la política de riesgo y la misión de la carga; el libro no propone un umbral universal para todos los campus.

Dimensión	Indicadores que deben revisarse juntos	Decisión que habilitan
Potencia y capacidad vendible	MW disponibles por etapa y frontera; margen eléctrico y térmico; capacidad IT aceptada, contratada, reservada y libre	Aceptar, frenar o reprogramar ventas y expansión; reconciliar la fecha prometida con evidencia física
Servicio y cliente	Disponibilidad medida según cada SLA; créditos; incidentes severos; renovaciones, quejas y concentración por cliente	Proteger el servicio, acordar recuperación y evitar que un cliente o una promesa domine el riesgo
Facility y eficiencia	Alarmas críticas, pruebas vencidas, mantenimiento diferido, consumo, PUE y WUE con periodo y alcance definidos	Corregir tendencia, priorizar mantenimiento y evaluar eficiencia dentro de condiciones comparables
Conectividad	Rutas con diversidad comprobada, capacidad bajo falla, latencia y pérdida por destino, fallas compartidas y vigencia de trazados	Reducir riesgo común, abrir capacidad alterna o informar al cliente de una condición degradada
Economía	CAPEX pronosticado al término, variación de cronograma, OPEX, consumo eléctrico, ingresos facturados, caja cobrada y margen	Reasignar capital, renegociar alcance, revisar tarifas o someter la desviación al comité
Seguridad y riesgo	Accidentes e incidentes de alto potencial, accesos privilegiados, vulnerabilidades críticas, obligaciones y acciones correctivas vencidas	Detener, contener, investigar, escalar a autoridad o aceptar formalmente riesgo residual

Dimensión	Indicadores que deben revisarse juntos	Decisión que habilitan
Personas y proveedores	Cobertura efectiva por turno, habilitaciones vigentes, vacantes críticas, horas extra, repuestos y compromisos de proveedor	Contratar, capacitar, activar suplencia, ajustar carga laboral o aplicar plan de contingencia
Construcción y readiness	Hitos de energía, facility y conectividad; defectos críticos; pruebas aprobadas; documentación y personal entrenado	Aprobar una fase, mantenerla en espera o impedir que una fecha comercial se adelante a la aceptación

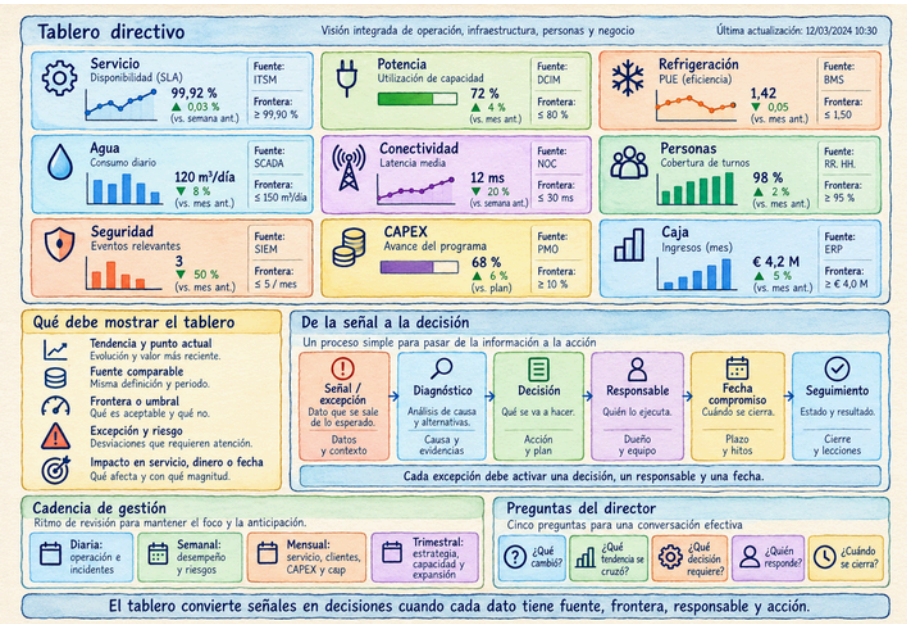


Figura 31. El tablero que convierte señales en decisiones

Lectura. El director revisa tendencias con fronteras y fuentes comparables en servicio, potencia, refrigeración, agua, conectividad, personas, seguridad, CAPEX y caja. Cada excepción debe activar una decisión, un responsable y una fecha, no solo un semáforo. Los objetivos dependen del contrato, el diseño, la regulación y la misión de la carga. Los valores, umbrales y fecha del tablero dibujado son ilustrativos; no son resultados operacionales observados.

El tablero debe mostrar tendencia y excepción, no ocultar incertidumbre bajo promedios. Una disponibilidad agregada del campus puede esconder un incumplimiento de cliente; un PUE anual puede ocultar una estación desfavorable; una cifra de capacidad puede sumar MW de facility y de TI; un KPI verde puede carecer de fuente independiente. El responsable presenta el dato, el director pregunta qué decisión cambia y el acta conserva la respuesta.

Cadencia de gestión y decisiones

La cadencia separa respuesta inmediata de gobierno del negocio. Cada reunión tiene un propósito, participantes con autoridad y un

registro de acuerdos. Una reunión diaria no reemplaza una revisión mensual de resultados; una presentación mensual no reemplaza la coordinación inmediata durante una emergencia.

Ritmo	Foco y participantes	Salida exigible
Diario	Seguridad, alarmas, cambios, capacidad cercana, clientes afectados, trabajos autorizados; operación, facility, NOC/SOC y guardia	Riesgos del día, dueño y hora límite, restricciones de trabajo y comunicación al cliente
Semanal	Incidentes y causa raíz, mantenimiento, readiness, ruta de expansión, proveedores, pendientes y próximos hitos; líderes de disciplina y comercial	Lista priorizada de riesgos, pruebas, capacidad bajo contingencia y decisiones que requieren escalamiento
Mensual	Resultado financiero y operacional, cumplimiento de SLA, MW por estado, energía y agua, CAPEX, forecast, personas y clientes; director, finanzas, comercial, facility, IT/red, seguridad	Acta de revisión del negocio, decisiones de inversión, desviaciones aceptadas, medidas correctivas y responsables
Trimestral	Riesgo sistémico, escenarios de demanda, concentración, resiliencia, seguros, proveedores críticos, clima, permisos y cartera de capital; dirección y comité pertinente	Revisión de riesgos principales, priorización plurianual y escenarios de continuidad

Ritmo	Foco y participantes	Salida exigible
Anual	Estrategia de capacidad, presupuesto, obsolescencia, simulacro integrado, sucesión, competencias, cumplimiento y objetivos de sostenibilidad	Plan anual aprobado, metas trazables, inversión y responsables por objetivo

La agenda mensual comienza por las personas y la seguridad; sigue con el cliente, la disponibilidad y los incidentes; revisa después MW, energía, refrigeración, conectividad y obra; cierra con caja, CAPEX, riesgos, decisiones y compromisos. Si hay una alarma física o una lesión, se resuelve primero la seguridad y la continuidad; la agenda financiera espera.

Gobierno de incidentes: decidir con rapidez y límites claros

Durante una interrupción, el director establece el objetivo de servicio y moviliza recursos, pero no reemplaza al comandante técnico ni autoriza una maniobra fuera de procedimiento. La estructura de mando debe estar acordada antes del evento y practicada en ejercicios integrados.

1. **Proteger vida y seguridad:** detener trabajo inseguro, confirmar el estado del personal, activar asistencia y preservar el control del sitio.
2. **Definir el impacto de servicio:** identificar cargas, clientes, capacidad afectada, dependencias compartidas y margen que conserva cada ruta o subsistema.
3. **Asignar autoridad:** nombrar líder del incidente, responsables de facility, IT/red, SOC, cliente y proveedor; fijar quién puede activar contingencias o aceptar un cambio.
4. **Comunicar con hechos:** decir qué se sabe, qué falta, qué acciones se ejecutan y cuándo será la próxima actualización; no convertir una hipótesis en causa raíz.

5. **Cerrar la recuperación:** confirmar pruebas de servicio, restituir redundancia, comunicar el estado residual, documentar costos y asignar acciones con fecha y prueba de cierre.

El reporte ejecutivo separa restauración del servicio, reparación del componente, vuelta a la redundancia normal y cierre de las acciones correctivas. Una carga restablecida por una ruta alterna puede seguir expuesta. El director no declara el sistema normal mientras una protección esencial esté indisponible sin aceptación de riesgo y autorización documentadas.

Primeros 90 días en la dirección del activo

El primer plan de entrada no supone que el nuevo director deba cambiar la organización antes de comprenderla. Empieza por establecer una línea base fiable, escuchar a clientes y equipos de turno, recorrer el sitio con responsables técnicos y verificar las fronteras de decisión. La secuencia siguiente es un marco adaptable, no un calendario contractual.

Periodo	Trabajo de dirección	Entregable verificable
Días 1–30: entender	Reunirse con turnos y líderes; leer contratos, permisos, presupuesto, SLA, incidentes, riesgos y planes de expansión; inspeccionar sala eléctrica, refrigeración, MMR, rutas y centro de control acompañado por especialistas	Mapa de capacidad por estado, organigrama operativo, lista priorizada de obligaciones y brechas, lectura de clientes y revisión de riesgos inmediatos

Periodo	Trabajo de dirección	Entregable verificable
Días 31–60: comprobar	Reconciliar inventario, MW, facturación y forecast; revisar mantenimiento diferido; confirmar diversidad de rutas; entrevistar a clientes y proveedores; observar un relevo y ejecutar un ejercicio de incidente	Tablero validado con fuente y dueño, registro de fallas comunes, matriz de contratos, acciones de seguridad y lista de decisiones que requieren capital
Días 61–90: decidir	Presentar prioridades con escenarios y sensibilidad; definir nivel de riesgo aceptable; aprobar calendario de revisión; alinear ventas, construcción y operación; cerrar responsabilidades y suplencias	Plan de 12 meses con metas, presupuesto, responsables, hitos, condiciones de parada, agenda mensual y comunicación ejecutiva

El resultado de los primeros 90 días no es un informe que se archiva, sino un acuerdo de dirección: qué se va a mejorar, cuánto costará, quién responde, qué evidencia demostrará el avance y qué decisión cambiará si la condición no se cumple.

Caso de dirección: un contrato antes que la evidencia

Supóngase que un cliente solicita una entrega de 8 MW para una fecha específica. La empresa eléctrica documenta 6 MW para esa etapa; los 2 MW restantes dependen de una ampliación cuyo plazo aún no está confirmado. El plan comercial presenta dos operadores de fibra, pero el levantamiento indica que comparten un corredor crítico. El director no convierte el compromiso comercial en una cifra de capacidad segura. Pide reconciliar MW de conexión, facility e IT, y comprobar la ruta hasta cada operador.

Con esos datos puede evaluar alternativas: entrega escalonada; una fecha condicionada a la ampliación eléctrica; una inversión del cliente en capacidad dedicada; protección adicional para la conectividad; o no aceptar el hito. Cada alternativa se compara por CAPEX, ingresos, créditos, capacidad sobreviviente, costos de oportunidad y confianza del cliente. La decisión queda registrada con responsable, evidencia pendiente, presupuesto, condición de aceptación y comunicación aprobada. El juicio directivo está en identificar qué promesa sí puede sostenerse y qué condición no se puede esconder en un promedio.

Operación como fase de ingeniería

La conectividad madura continúa siendo verificable después de la entrega. Los planos se mantienen, los puertos se inventarían, las rutas se comparan con cambios y las líneas base se usan para detectar degradación. La operación se organiza en procedimientos rutinarios (SOP), procedimientos de método de trabajo (MOP) y procedimientos de emergencia (EOP), con revisión, aprobaciones y rollback adecuados.

Un NOC necesita ver la red lógica; el equipo de planta necesita localizar el activo físico; el operador del centro de datos necesita entender si el cambio afecta MMR, cross-connects o rutas A/B; el responsable de servicio necesita conocer usuarios y aplicaciones impactadas. La coordinación depende de identificadores compartidos y un registro de cambios que vincule circuito, puerto, ruta, dueño y servicio.

Observabilidad por dominio y de extremo a extremo

No existe una sola consola que muestre toda la cadena. BMS y EPMS observan aspectos de las instalaciones; DCIM registra activos y capacidad; NMS y telemetría siguen equipos de red; herramientas de pruebas observan el servicio; el sistema de tickets reúne fallas y cambios. La arquitectura operacional integra datos por identificadores y tiempos comunes.

El tablero mínimo de conectividad crítica puede incluir disponibilidad por servicio, RTT p50/p95/p99, pérdida, jitter, utilización, errores de interfaz, potencia óptica, alarmas, estado de rutas y duración de failover. Las métricas se asocian a umbrales y responsables. Un aumento de errores ópticos puede ser un precursor; una elevación de RTT con baja utilización puede apuntar a ruta o procesamiento. La métrica no identifica la causa sin contexto, pero ayuda a reducir el tiempo hasta el diagnóstico.

Gestión de cambios

Todo cambio físico o lógico debe registrar motivo, servicio impactado, ruta afectada, dependencias comunes, riesgo, método, secuencia, pruebas antes y después, plan de retorno, ventana, aprobación y responsables. Un parche de fibra puede alterar la diversidad que se obtuvo durante el commissioning. Una actualización de política puede volver inútil una ruta que sigue encendida. El control de cambios vincula lo que ocurrió con lo que el plano y el inventario muestran.

La gestión de configuración detecta diferencias entre el estado previsto y el real. Los circuitos que no tienen propietario, las fibras sin destino, los puertos activos sin servicio registrado y los enlaces sin línea base deben investigarse. La deuda documental aumenta el riesgo operacional y prolonga las reparaciones.

Vigencia de la evidencia y deuda de resiliencia

La evidencia pierde valor si deja de describir la red instalada. Cada registro de ruta, prueba, contrato y configuración necesita un identificador, propietario, versión, fecha, fuente y condición de revalidación. La antigüedad por sí sola no determina vigencia: una ruta puede cambiar mañana; una prueba reciente puede dejar de representar el servicio tras una reparación o un nuevo cross-connect.

Se revalida cuando cambian el corredor, el ducto, la entrada, el carrier, el punto de demarcación, el MMR, el cross-connect, la

política de encaminamiento, la capacidad, la protección o el método de medición. También se revisa después de una falla, una reparación, un mantenimiento que afecte rutas o un cambio de plataforma. El registro marca qué pruebas quedaron afectadas y qué servicio necesita volver a probarse.

La deuda de resiliencia describe una brecha que puede reducir la protección esperada: dependencia compartida no resuelta, capacidad insuficiente bajo falla, recuperación sin ensayo o evidencia que ya no corresponde a la configuración. La ficha de brecha anota impacto, control temporal, responsable, autoridad que acepta el riesgo, fecha límite y evidencia que cerrará la acción. Un riesgo aceptado debe tener alcance y vencimiento; no debe convertirse en una excepción indefinida.

Aseguramiento de planta externa y vigilancia óptica

La línea base de fibra se conserva con trazas nativas, mediciones de pérdida y reflectancia, parámetros del instrumento, extremos, ruta y fecha. En los sistemas que lo soportan, la telemetría de potencia, errores, alarmas de transporte y monitoreo remoto puede ayudar a detectar una desviación antes de que se transforme en interrupción. La planta externa se relaciona con el inventario de cámaras, ductos, empalmes, cruces, titularidad y acceso de reparación.

Una alerta óptica identifica un cambio, no necesariamente su causa raíz. Para explicarlo se correlaciona la señal con registros de configuración, alarmas del operador, tickets, trabajos de campo y mediciones de confirmación. Después de un corte, empalme, reparación, cambio de ruta o intervención, se actualiza la línea base y se verifica que la pérdida, la continuidad y la diversidad sigan dentro del criterio aprobado.

El aseguramiento mantiene una secuencia simple: detectar una variación, identificar los servicios y rutas relacionados, asignar un responsable, reunir evidencia, inspeccionar o medir, registrar la

causa confirmada y actualizar inventario y procedimiento. Cuando la causa no se comprueba, se registra como hipótesis pendiente, no como diagnóstico cerrado.

Derechos de decisión y responsabilidad operacional

La gobernanza asigna un dueño a cada decisión que atraviesa disciplinas. El dueño del servicio define criticidad y objetivos; el responsable de infraestructura acepta el diseño físico y el riesgo residual; ingeniería integradora relaciona requisitos, rutas y pruebas; el carrier declara sus límites y entrega evidencias; operaciones recibe procedimientos, alarmas y escalamiento. Seguridad participa en la política de encaminamiento y el acceso a información sensible.

Una matriz RACI identifica quién responde por la decisión, quién ejecuta y documenta, a quién se consulta y quién recibe la información. Para cada actividad se designa una sola autoridad final (A). Las responsabilidades reales se ajustan a los contratos, la estructura del operador y el régimen local; la matriz por sí sola no crea autoridad ni reemplaza una aprobación formal.

SLA SLO y responsabilidad

El SLA contractual, el objetivo interno de servicio (SLO) y la experiencia de usuario responden preguntas distintas. El proveedor puede medir desde su demarcación; el propietario puede medir hasta el router de borde; la aplicación puede medir desde un agente dentro del campus. Las tres perspectivas se relacionan en una matriz de responsabilidad.

El contrato especifica disponibilidad, latencia si corresponde, pérdida, ventana de mantenimiento, método de medición, exclusiones, notificación, tiempo de restauración, créditos, escalamiento y cooperación en incidentes. Una promesa vaga de “alta disponibilidad” no permite atribuir impacto ni exigir recuperación. Para servicios críticos, el contrato también define

cómo se comparte información de ruta sin exponer detalles que el operador debe proteger.

Incidentes y aprendizaje

El análisis posterior documenta línea de tiempo, evento disparador, causa inmediata, causas contribuyentes, alcance, recuperación, comunicación, datos faltantes, controles que funcionaron y acciones pendientes. Se distingue la falla de componente de la falla de proceso. Si dos operadores dependen del mismo ducto, el problema es de diseño y de información; aumentar la velocidad de escalamiento no crea diversidad física.

Los simulacros deben repetirse después de cambios relevantes y tomar en cuenta turnos, personal externo, rutas de escalamiento y disponibilidad de planos. Una arquitectura que solo puede recuperarse con el ingeniero que la diseñó no es sostenible.

Una interrupción de cuatro horas tiene varias etapas y dos relojes

La reparación física no es el único reloj de una interrupción. El servicio puede recuperarse mediante failover mientras la ruta primaria continúa dañada; también puede seguir degradado aunque ya exista personal en terreno. La operación registra por separado el tiempo hasta restablecer la función y el tiempo hasta reparar, probar y cerrar el activo físico.

Etapa	Pregunta operacional	Evidencia de cierre
Detección y alerta	¿Qué indicador cruzó umbral y quién fue notificado?	Marca temporal, alarma, ticket y servicio identificado
Diagnóstico y trazado	¿Qué tramo, ruta o dependencia está afectado?	Pruebas, topología activa, hipótesis y nivel de confianza

Etapa	Pregunta operacional	Evidencia de cierre
Coordinación con terceros	¿Qué carrier, dueño de ducto o autoridad debe intervenir?	Acuse, responsable técnico, escalamiento y próxima actualización
Movilización y acceso	¿Hay cuadrilla, repuestos, seguridad y acceso al sitio?	Hora de despacho, ingreso, permisos y limitaciones
Intervención	¿Qué obra, excavación, empalme o cambio está autorizado?	Permiso, método, controles de seguridad, fotos y hora de trabajo
Reparación y prueba	¿El activo volvió a su condición de diseño?	Mediciones ópticas, configuración, prueba de servicio y as-built
Recuperación funcional	¿La aplicación cumple su SLO y se puede devolver el tráfico?	RTT, pérdida, capacidad, resultado de usuario y aprobación del dueño

El plan de respuesta debe definir mensajes a clientes, frecuencia de actualización, criterio para declarar degradación mayor, autoridad para activar rutas alternas y condición para volver al camino normal. Si se pierde una ruta física pero el servicio sigue por otra, se abre una brecha de resiliencia con responsable y fecha de expiración; no se cierra el incidente como si la redundancia ya estuviera restablecida.

El impacto financiero se calcula con datos del cliente y sin contar dos veces la misma consecuencia. Una estructura posible es: margen de contribución perdido + costo de recuperación y operación manual + penalizaciones contractuales aplicables + costo incremental de recuperar colas o transacciones + efectos validados sobre clientes, menos costos variables evitados. Reputación, riesgo regulatorio y ventas futuras pueden requerir escenarios separados en vez de una suma especulativa.

El costo financiero depende de qué servicio deja de cumplir su obligación y de qué capacidad deja de ser facturable. Como

equivalencia ilustrativa, 60 MW a US$145/kW-mes representan unos US$47.700 de ingreso bruto prorrateado por cuatro horas; 342,22 horas acumuladas equivalen a unos US$4,08 millones. Esta cuenta solo aplica si toda esa capacidad deja de facturar durante ese tiempo. No es una penalidad ni una pérdida confirmada. El costo del cliente por cómputo o transacciones no completadas exige sus propios datos; créditos, recuperación y productividad se modelan por separado para evitar doble conteo.

Observabilidad: indicadores que conducen a decisiones

La observabilidad útil no consiste en una pared llena de gráficas. Cada indicador debe tener definición, límite, unidad, denominador, fuente, frecuencia, dueño, umbral, ventana, acción y destinatario. Se separa lo que se promete al cliente de lo que el operador monitorea para anticipar una degradación. Un dato no tiene valor operacional si nadie sabe qué hacer cuando se sale de rango.

Indicador	Definición y límite	Uso operacional
Capacidad eléctrica disponible	MW con fuente, frontera, estado de conexión y criterio de firmeza declarados	Detectar diferencia entre anunciada, contratada, conectada, energizada y vendible
Capacidad IT libre y contratada	MW IT aceptados, vendidos, reservados y libres en la misma fase	Evitar vender capacidad que no puede entregarse dentro de fecha y densidad
PUE y WUE	Energía total/IT y volumen de agua/IT; periodo, medidores y exclusiones explícitos	Comparar eficiencia solo con fronteras y clima comparables
RTT p50/p95/p99, pérdida y jitter	Extremos, ruta, sentido, clase, muestreo y ventana identificados	Ver degradación de aplicación y comprobar niveles de servicio
Diversidad de ruta	Dependencias comunes verificadas por tramo y proveedor	Identificar cuándo la redundancia declarada deja de ser real

Indicador	Definición y límite	Uso operacional
Capacidad bajo contingencia	Throughput y carga que permanece tras un evento definido	Confirmar que el failover no conserva conectividad a costa de saturación
Tiempo de restauración	Detección, failover, recuperación funcional y reparación física por separado	Comparar RTO con el resultado real y dirigir inversiones
Alarmas accionables	Alarmas relevantes, falsas, duplicadas y sin dueño	Reducir ruido y encontrar condiciones que no generan respuesta
Incidente de causa común	Eventos que afectan más de un activo o dominio por una misma causa	Enfocar mitigaciones en dependencias compartidas, no en conteos de componentes
Ocupación y calidad	Capacidad facturable, en servicio y utilizada, con reglas contractuales	Conectar operación, ingresos, demanda y expansión

La jerarquía de medición comienza en el sensor y termina en la decisión. El operador registra calibración, reloj, pérdida de telemetría, exclusiones, cambios de configuración y fuente de verdad. Las series de energía se reconcilian con medidores y facturas; la latencia se conserva con información de ruta; la capacidad incluye límites de redundancia; la ocupación distingue reservas de clientes activos. Una cifra falsa con varios decimales es peor que un rango honesto con incertidumbre declarada.

Personas y operación continua

Una infraestructura que promete servicio 24/7 necesita cobertura real 24/7. Esto requiere relevos, autoridad por turno, formación, acceso, salud y seguridad laboral, documentación actual, proveedores de apoyo, inventario de repuestos, capacidad de despacho y transferencia de conocimiento. Un organigrama no

prueba cobertura si un único técnico posee la clave, el conocimiento o la autorización para ejecutar una maniobra crítica.

Función	Responsabilidad recurrente	Interfaz que debe quedar clara
NOC	Estado de red, alarmas, capacidad, cambios y escalamiento	Carrier, clientes, facility y SOC
SOC	Alertas de seguridad, triage, contención y preservación de evidencia	NOC, seguridad física, legal y proveedores
Control de facility	Energía, refrigeración, agua, incendio y maniobras autorizadas	Facility manager, NOC, SOC y empresas eléctricas
Operación de centro de datos	Accesos, manos remotas, inventario, cambios y atención al cliente	Cliente, seguridad, MMR y mantenimiento
Planta externa y terreno	Inspección, excavación, empalme, medición y restauración	Carrier, autoridad, dueño de ducto y coordinador de obra
Mantenimiento especializado	Pruebas de UPS, generadores, baterías, chillers y controles	Fabricante, operación y plan de contingencia
Dirección de incidente	Prioridades, riesgo aceptado, comunicaciones y recursos	Cliente, proveedor, autoridad y liderazgo ejecutivo

El relevo de turno entrega estado de equipos, alarmas pendientes, trabajos en curso, inhibiciones, permisos, clientes afectados y decisiones que caducan. Los procedimientos distinguen SOP para operación normal, MOP para mantenimiento o cambio y EOP para emergencia, con límites de autoridad definidos por el sitio. La fatiga, trabajo en altura, riesgo eléctrico, excavación, espacios confinados, conducción y trabajo nocturno son factores de

continuidad: una cuadrilla no llega a reparar si se le asignan tareas inseguras o si no existe permiso de acceso.

La matriz de competencias registra rol, actividad, habilitación, última práctica, suplente y brecha. El plan de sucesión cubre vacaciones, rotación, proveedores que abandonan el mercado y salida del especialista. Los simulacros rotan hora y composición de equipo para probar que el conocimiento está distribuido y que las decisiones no dependen de una sola persona.

Lectura de fallas públicas: del evento físico al servicio

Los postmortems públicos permiten observar cómo una causa localizada cruza redes, controles y contratos. No reemplazan el análisis del propio operador; cada incidente tiene topología y carga distintas. La tabla separa el hecho comunicado de la lección de diseño que se extrae para este libro.

Caso público	Hecho comunicado por el operador	Cadena de impacto	Lección de diligencia
Google Cloud, Medio Oriente, 7 de junio de 2022 [52]	Dos cortes de fibra simultáneos causaron escasez de capacidad; el incidente duró 3 h 12 min y hubo pérdida de paquetes o latencia elevada en servicios regionales	Pérdida física → capacidad insuficiente → degradación de red y servicios de nube → retrasos y timeouts de clientes	Preguntar por capacidad sobreviviente después de fallas múltiples, no solo por número de rutas

Caso público	Hecho comunicado por el operador	Cadena de impacto	Lección de diligencia
Google Cloud, Australia-southeast2, 29 de octubre de 2024 [53]	El informe describió interrupción eléctrica con reinicio de infraestructura de red y óptica en algunos sitios; también había fallas de fibra en reparación. El evento se extendió 3 h 13 min y el impacto varió por servicio	Potencia y condiciones de red coexistieron; el operador reportó drops de solicitudes y afectación de varios servicios	Analizar causas concurrentes y secuencia de recuperación; no reducir un evento compuesto a un único componente
AWS, US East, 2011 [54]	La pérdida de energía dejó fuera de servicio instancias de una zona; operaciones de control de EBS tuvieron una indisponibilidad más amplia mientras se recuperaba un datastore primario	Falla eléctrica local → instancias y volúmenes afectados → dependencias del plano de control y recuperación regional	Separar dominios de falla de cómputo, almacenamiento y control; probar cómo se recuperan las operaciones administrativas
Meta, 4 de octubre de 2021 [55]	Un cambio de configuración retiró conectividad de backbone; las ubicaciones DNS se declararon no saludables y retiraron anuncios BGP, haciendo inaccesibles servicios y herramientas internas desde Internet	Cambio en backbone → anuncios BGP retirados → DNS y servicios inalcanzables → recuperación requirió intervención coordinada en sitio	Revisar acceso fuera de banda, dependencias de autenticación y capacidad de operar cuando caen las herramientas corporativas

En la lectura de cada caso se separan cinco tiempos: detección, activación de contingencia, restauración funcional, comunicación y reparación definitiva. Los reportes de operadores son fuentes primarias del evento, aunque la información pública puede no exponer todos los detalles de arquitectura. El análisis no atribuye culpa ni asume causalidad que el postmortem no haya establecido.

La revisión posterior debe formular preguntas nuevas: ¿qué activo compartían las rutas?, ¿qué capacidad sobrevivió?, ¿qué alarma llegó primero?, ¿qué operación manual estaba disponible?, ¿qué datos faltaron para decidir?, ¿qué dependencia de proveedor o control prolongó la recuperación?, ¿qué prueba demostraría que la acción correctiva funcionó? La publicación de una causa raíz sin prueba de cierre no demuestra que el riesgo haya sido reducido.

Campus Horizonte | De la aceptación al tablero mensual

Expediente hipotético H-14. El director debería leer cada bloque en un tablero con cinco números no equivalentes: MW IT aceptados, MW IT bajo contrato, MW con condición de facturación cumplida, ingresos devengados y caja cobrada. En columnas separadas figuran disponibilidad, carga que sobrevive bajo contingencia, margen térmico, rutas físicas, mantenimiento atrasado y excepciones de seguridad.

El gobierno mensual revisa decisiones y no solo alarmas: ¿qué evidencia falta para el siguiente bloque?, ¿qué cambio ha creado una dependencia compartida?, ¿qué riesgo residual se admite?, ¿qué capital puede liberarse?

Preguntas de aplicación

1. ¿Qué promesa al cliente no puede sostener hoy el sitio, qué evidencia lo demuestra y quién debe decidir la acción, el plazo y el riesgo residual?

2. ¿Qué riesgo residual exige decisión ejecutiva y quién tiene autoridad para aceptarlo?
3. ¿Qué tablero, registro de incidentes y plan de 90 días reflejan el estado del activo?

Práctica de dominio

Revise un sitio con el Toolkit S y presente al comité servicio, capacidad, economía, riesgos, personas, decisiones, responsables y fechas. Alinee lo vendido, lo disponible y lo cobrable.

Parte VI · Auditar el MW facturable

Los capítulos anteriores describieron el activo por capas y por decisiones. Esta parte reúne esos dominios en una pregunta para el comité de inversión: ¿puede este capital convertirse en megavatios disponibles, contratados y rentables dentro del plazo previsto? La respuesta requiere evidencia compatible entre demanda, sitio, permisos, potencia, conectividad, construcción, contratos y operación. No basta con que cada área entregue una presentación optimista; los hitos tienen que encajar en una misma fecha y frontera.

26. Del MW anunciado al MW facturable

Objetivo del capítulo: clasificar el estado de una capacidad, comparar modelos de centro de datos, estructurar una due diligence y recomendar condiciones precedentes para aprobar, diferir o detener capital.

Qué diferencia la auditoría de esta obra

El *Data Center Handbook* de Wiley ya cubre planificación, diseño, construcción y operación, además de energía, sostenibilidad y análisis financiero, ROI, TCO y gestión del riesgo [59]. Esta obra no se diferencia por reunir esos temas ni por presentar siete preguntas como si fueran novedad. Su eje es auditar cada bloque de MW desde la capacidad física hasta la condición contractual de facturación, probar si la conectividad es realmente independiente y traducir las brechas y fallas compartidas a CAPEX, plazo, ingresos, obligaciones de servicio y valor del activo.

La necesidad de un análisis así aparece también en la encuesta global de CBRE de 2025 a 92 inversionistas: 39 % señaló regulación y disponibilidad de potencia como su principal desafío, frente a 10 % que citó disponibilidad de deuda. Es una señal de las opiniones de esa muestra y ese año, no una regla universal ni una prueba de viabilidad para un proyecto particular [58].

La unidad de análisis es la capacidad que puede venderse

La cifra de MW necesita una frontera, una fase, una fecha y una definición: potencia de conexión, potencia de facility, capacidad IT o bloque comercial. El expediente declara pérdidas de conversión, reserva para contingencia, perfil de carga, refrigeración y criterio de disponibilidad. El registro utiliza una unidad homogénea antes de comparar proyectos; una diapositiva puede ser numéricamente precisa y aun así mezclar magnitudes incompatibles.

La cadena de capacidad no siempre avanza en una sola secuencia: un contrato puede firmarse antes de la construcción y un pago por reserva puede empezar antes de la entrega. Por ello cada proyecto mantiene dos trazas coordinadas, una física y otra comercial, y las cruza por fecha y condición de cobro. La escalera es vocabulario de due diligence, no una secuencia legal universal.

Estado a la fecha de corte	Qué significa	Evidencia que debe pedirse
MW anunciado	Objetivo comercial o de diseño, todavía no habilitado	Alcance de la cifra, emisor, supuestos, fase y fecha
Sitio y derechos bajo control	Se puede estudiar, desplegar infraestructura y ejercer los derechos declarados	Título u opción, accesos, servidumbres, expansión y vigencia
Permisos y ruta de desarrollo	Se conoce qué autorizaciones y obras condicionan el plazo	Matriz de permisos, solicitudes, resoluciones, riesgos y calendario
Capacidad eléctrica documentada	Una entidad competente ha definido capacidad, frontera, condiciones y ruta de conexión	Estudios, acuerdos, obras, costo, garantías, hitos y vencimientos
Conectado físicamente	Las instalaciones alcanzan la demarcación declarada	Inspección, as-built, derechos de acceso y acta de conexión

Estado a la fecha de corte	Qué significa	Evidencia que debe pedirse
Energizado y probado	La potencia se recibe y los sistemas asociados superan pruebas definidas	Medición, protecciones, pruebas integradas y autorización de operación
MW IT utilizables	La carga IT puede operar después de pérdidas, reserva, límites térmicos y contingencia declarada	Diseño, pruebas bajo carga, capacidad de cooling y aceptación técnica
Conectividad calificada	El servicio alcanza los destinos requeridos con capacidad y desempeño medidos	Trazados, capacidad sobreviviente, RTT/pérdida, MMR y failover
MW contratados	Cliente y proveedor aceptan producto, capacidad, precio, plazo y obligaciones	Contrato ejecutable, contraparte, condiciones, ramp-up y terminación
MW que cumplen el hito de facturación	Las condiciones de cobro definidas en el contrato se han cumplido a la fecha de corte	Acta o aceptación exigida, disponibilidad, medición y cláusula de inicio
Importe facturado y caja cobrada	El derecho de cobro pasó a factura y luego a pago efectivo	Facturas, notas de crédito, conciliación, vencimiento y cobro bancario

Los documentos comerciales y físicos pueden avanzar en fechas distintas. Un pago por reserva, una tarifa de capacidad y un cargo por energía consumida deben aparecer en líneas separadas. Si el cliente debe pagar antes de que exista capacidad entregada, el modelo identifica esa obligación y su riesgo de exigibilidad, terminación o crédito; no la presenta como MW IT disponibles. En sentido inverso, la capacidad puede estar instalada y aun no facturarse si falta aceptación, una condición contractual, el cliente o un hito de servicio.

Para esta obra, MW facturable significa que la condición contractual de facturación correspondiente a ese producto y bloque se ha cumplido en la fecha de corte. MW facturable no equivale a importe cobrado: entre ambos quedan emisión de factura, disputas, notas de crédito, plazo de pago y riesgo de contraparte. Cuando el producto cobra por energía o consumo, la cantidad se calcula con la unidad y el medidor del contrato; no se convierte automáticamente en un cargo por MW.

Auditoría de bancabilidad física y comercial

La auditoría cruza evidencia física, conectividad, contrato y finanzas con una misma fecha de corte. Cada cifra conserva su frontera y definición. El método entrega tres resultados de decisión, no una calificación agregada:

Resultado	Registro mínimo	Decisión que permite
MW demostrables	MW por fase, métrica, frontera, fecha, escenario, prueba y responsable	Cuánto puede considerarse técnicamente disponible y con qué condición
Dependencias expuestas	Dominios compartidos, escenario, capacidad que sobrevive, duración y calidad del servicio	Qué falla común puede limitar energía, conectividad, SLA o reparación
Impacto económico	Calendario, CAPEX, MW facturables expuestos, ingreso/margen, créditos, costos y ΔNPV	Qué brecha condiciona capital, reserva, contrato, retorno o salida

La auditoría se completa en siete acciones:

1. Definir producto, fase, fecha de corte y frontera de medición; separar MW de conexión, facility e IT.
2. Conciliar capacidad anunciada, derechos, permisos, conexión, energía, facility, MW IT y pruebas integradas.

3. Mapear las rutas hacia los destinos del cliente y verificar entradas, ductos, cámaras, edificios, MMR, PoP, carriers y terceros.
4. Identificar las dependencias compartidas de edificio, territorio, transporte, interconexión, relación comercial, operación, energía y control.
5. Vincular cada bloque con contrato, precio, cliente, aceptación, condición de facturación, indexación, créditos, terminación y pago.
6. Ejecutar escenarios de pérdida o retraso; registrar MW que sobreviven, días de degradación, acciones de recuperación y evidencia faltante.
7. Calcular por separado la exposición de CAPEX, OPEX, ingresos, margen, créditos y valor; proponer condiciones precedentes con dueño, fecha y prueba.

El estado de cada hallazgo se marca como demostrado, condicionado, en investigación o no demostrado. La cifra principal del comité no debe ser un MW sin apellidos, sino una lectura que diga cuántos MW están demostrados, en qué frontera, desde cuándo, para qué servicio y bajo qué contrato. Una ruta en un mapa, dos facturas de carriers o una carta de interés no prueban por sí solas capacidad independiente o facturable.

Ocho lentes de inversión organizan la evidencia

La matriz siguiente ayuda a reunir a desarrollo, ingeniería, legal, operaciones, comercial y finanzas en la misma conversación. Las siete Puertas de Viabilidad funcionan como filtro transversal; esta vista agrupa evidencia para comparar activos y calcular el retorno.

Lente	Pregunta del comité	Evidencia prioritaria
Demanda comprobable	¿Quién comprará qué bloque, desde cuándo y con qué obligación?	Contratos, reservas, proceso comercial, concentración, solvencia y contingencia si sale el cliente ancla

Lente	Pregunta del comité	Evidencia prioritaria
Potencia entregable	¿Cuánta potencia llega, a qué frontera, fecha, costo y nivel de firmeza?	Documentos de red, estudios, obras, conexión, medición, suministro y pruebas
Modelo de negocio	¿Qué producto se vende y qué riesgo asume el dueño?	Colocation, wholesale, build-to-suit, powered shell o AI Factory; contratos y operación
Sitio y permisos	¿Se puede construir, operar y expandir sin perder recursos críticos?	Suelo, derechos, permisos, clima, agua, comunidad, acceso y cronograma
Conectividad	¿El sitio llega a los clientes y mantiene servicio con una ruta o proveedor fuera?	Rutas físicas, PoP, MMR, operadores, latencia, capacidad y recuperación
Entrega y CAPEX	¿El costo cubre el alcance aceptado y los equipos llegarán a tiempo?	Presupuesto comparable, contingencia, long-lead, compras, obras y commissioning
Ingresos y retorno	¿Cuándo se factura, cuál es la utilización necesaria y qué sensibilidad cambia el retorno?	Contratos, precio, energía, ocupación, margen, financiamiento, DSCR, NPV e IRR
Operación, riesgo y salida	¿Puede operar, responder, mantener, financiar y venderse el activo durante su vida?	Personal, repuestos, SLA, seguros, ciberseguridad, obsolescencia, refinanciamiento y comprador potencial

Demanda diferenciar intención de obligación

El plan de negocio registra clientes objetivo por producto, carga, ubicación, fecha, duración, ramp-up y perfil horario. Una carta de interés puede evidenciar conversación; no crea los ingresos de un contrato. Una reserva puede estar condicionada a potencia, permisos, precio o hitos de obra. Un contrato firmado puede seguir expuesto a terminación, crédito, retraso, incumplimiento de

condiciones precedentes o salida temprana. El modelo separa esas categorías y asigna probabilidades explícitas a cada una.

Un cliente ancla reduce incertidumbre si toma capacidad suficiente, firma por un plazo adecuado, acredita solvencia y asume obligaciones compatibles con la deuda y la expansión. A la vez, puede crear concentración: si ocupa una porción dominante del ingreso y se retira, la infraestructura puede quedar sobredimensionada o requerir una inversión comercial adicional para reutilizarse. El comité pregunta por garantías, depósitos, crédito, step-in, expansión, terminación, renovación, energía pasante y asignación de CAPEX específico.

La demanda también necesita compatibilidad técnica. El cliente puede necesitar racks de alta densidad, refrigeración líquida, rutas carrier-neutral, acceso a una nube determinada, residencia de datos, conexión a sistemas industriales o una fecha de entrada fija. Un mercado agregado grande no demuestra demanda local si el sitio no ofrece el producto que los compradores quieren adquirir.

Potencia: registrar el estado, la fecha y la frontera

El cronograma energético incluye solicitud, estudios, derechos de paso, subestación, transformadores, líneas, protecciones, obras de conexión, contratos de suministro, pruebas, puesta en tensión y disponibilidad operacional. Cada paso tiene responsable, dependencia, duración, permiso y costo. Un acuerdo preliminar no debe presentarse como fecha firme sin revisar qué supuestos podrían reabrir la evaluación.

El análisis separa MW eléctricos disponibles de MW IT vendibles. La conversión depende de eficiencia y diseño, redundancia, perfil de carga, refrigeración, distribución, reservas operativas y modo de falla. La capacidad debe modelarse para operación normal, mantenimiento y contingencia; la potencia no utilizada por diseño puede ser necesaria para cumplir una obligación de disponibilidad.

El suministro combina alternativas: red, acuerdos de compra de energía, generación renovable conectada o contratada, almacenamiento, generación de respaldo y respuesta de demanda. Cada componente tiene su propio perfil: producción horaria, firmeza, permisos, combustible, emisiones, pruebas, autonomía, reposición y capacidad de isla si se plantea. La etiqueta “renovable” no sustituye un análisis de potencia y continuidad en cada hora. El costo considera energía, demanda máxima, transporte, conexión, pérdidas, impuestos y cláusulas de indexación.

Modelo de negocio: el contrato determina el riesgo

Modelo	Qué aporta el operador	Ingreso principal	Riesgo que debe analizar el inversionista
Colocation retail	Espacio, energía, refrigeración, seguridad e interconexión por cliente	Racks, potencia, cross-connects y servicios	Ocupación gradual, complejidad de múltiples clientes y costos de operación
Wholesale	Bloques grandes de capacidad a pocos clientes	Capacidad y energía contratada por volumen	Concentración, contraparte y dependencia de expansión del cliente
Build-to-suit	Activo diseñado para un cliente o contrato específico	Contrato de largo plazo o renta de capacidad	Riesgo de personalización, aceptación, cancelación y reutilización
Powered shell	Suelo y edificio con infraestructura eléctrica o servicios de base según contrato	Arriendo o venta de espacio habilitado	Qué sistemas faltan, quién los completa y dónde se transfiere el riesgo

Modelo	Qué aporta el operador	Ingreso principal	Riesgo que debe analizar el inversionista
AI Factory	Campus integrado para cómputo acelerado, red, almacenamiento y refrigeración	Capacidad de cómputo, hosting o servicio gestionado	Utilización de aceleradores, obsolescencia, suministro, densidad térmica y rendimiento de clúster

Las etiquetas no son contratos estándar. Una propuesta debe especificar propiedad y mantenimiento de equipos, demarcación de energía, potencia mínima y máxima, refrigeración, conectividad, medición, disponibilidad, penalidades, seguros, impuestos, cambios, expansión, sustitución tecnológica y salida. Si el precio transfiere electricidad al cliente, se detallan tarifa, pérdidas, reconciliación y ajustes; si el propietario absorbe la variación, el modelo refleja la exposición.

Sitio, permisos, agua y conectividad: comprobar la viabilidad territorial

El suelo se revisa por título, uso permitido, saneamiento, acceso, expansión, riesgos naturales, contaminación, patrimonio, ruido y convivencia con el entorno. La matriz de permisos incluye la autoridad, su secuencia, requisitos, consultas, plazos, vigencia y posibilidad de apelación. Las servidumbres se comprueban para energía y telecomunicaciones, incluyendo instalación, inspección y reparación.

El agua se estudia con fuente, permiso, calidad, estacionalidad, consumo y condición de sequía; los peligros climáticos se modelan por severidad y duración, no solo por promedio histórico. El costo y disponibilidad de refrigeración dependen de calor, humedad, agua, energía, ruido, superficie y densidad. El proyecto define opciones si cambia el suministro hídrico o si una ola de calor reduce el margen.

La conectividad se comprueba entre el predio y los destinos comerciales relevantes. Dos carriers pueden usar un mismo ducto; dos rutas dibujadas pueden cruzar el mismo puente; una segunda entrada al campus puede converger en la misma cámara. La revisión investiga titulares, derechos, puntos de presencia, demarcaciones, MMR, backbone, estación de amarre y salida internacional. Después mide latencia y capacidad útil, y prueba qué tráfico conserva servicio cuando una ruta se pierde.

CAPEX calendario y equipos de largo plazo

El costo por MW solo es comparable si define MW IT o MW de facility, fase y fecha de precios; alcance de terreno, edificio, subestación, líneas, generadores, UPS, baterías, refrigeración, redes, equipamiento IT, seguridad, permisos, commissioning, honorarios, impuestos, contingencia y capital de trabajo. Dos cotizaciones con igual cifra pueden excluir sistemas distintos o asumir fechas de suministro incompatibles.

El cronograma integrado enlaza permisos, obras viales, red eléctrica, subestación, equipos, fibra, construcción, pruebas, autorización del cliente y facturación. Transformadores, switchgear, generadores, UPS, chillers, CDUs, aceleradores y ópticas pueden tener plazos y cadenas de suministro distintos; cada compra debe incluir especificación, fecha necesaria en sitio, garantía, repuesto, alternativa y riesgo de obsolescencia. El camino crítico se revisa con una holgura cuantificada y un costo de retraso.

CAPEX contiene obra, equipamiento y costos indirectos de desarrollo. OPEX incluye energía, cargos de demanda, conectividad, personal, mantenimiento, licencias, seguridad, seguros, agua, combustible, impuestos, cumplimiento, repuestos y renovación. Para cada cifra se registra moneda, año base, inflación, alcance, fuente y variabilidad. El modelo incorpora fase de ramp-up y costos de una capacidad construida que aún no genera renta.

Retorno convertir contratos y riesgos en escenarios

Los ingresos pueden provenir de potencia y espacio, consumo, interconexión, servicios, cómputo gestionado o acuerdos de energía; el modelo los separa para no cobrar dos veces por una misma capacidad. La ocupación distingue contrato firmado, capacidad reservada, espacio instalado, servicio aceptado y consumo facturable. Un contrato puede comenzar a facturarse en un hito distinto de la energización o de la instalación IT.

El modelo financiero usa las herramientas apropiadas al capital y a la estructura: flujo de caja, valor presente neto, tasa interna de retorno, cobertura de deuda (DSCR), apalancamiento, covenants y rendimiento de equity. No existe un umbral universal que sustituya el mandato del fondo, el costo de capital, la jurisdicción y el riesgo. Las métricas deben exponerse con horizonte, terminal value, impuestos, moneda, tasa de descuento y supuestos.

Escenario	Supuesto que se modifica	Qué mide el comité
Base	Contratos, fechas, costos y ocupación esperados	Retorno y cobertura bajo el plan operativo aprobado
Retraso de potencia	Conexión o subestación llega después del hito contractual	Liquidez, costos de espera, penalidad y capital adicional
Cliente ancla menor o ausente	Firma menos MW, demora rampa o termina antes	Ocupación necesaria, concentración y reutilización del campus
CAPEX elevado	Equipo, obra, interés y contingencia exceden base	Necesidad de equity, deuda, covenant y retorno
Energía costosa	Precio, demanda o disponibilidad empeoran	Margen, indexación, capacidad de repercutir el costo y riesgo de cancelación
Agua o clima adverso	Restricción de uso o reducción térmica	Carga disponible, inversión alternativa y compromiso ambiental

Escenario	Supuesto que se modifica	Qué mide el comité
Ruta degradada	Una falla deja menos capacidad o más latencia	Ingreso expuesto, SLA, costo de restauración y pérdida de cliente
Refinanciamiento difícil	Tasa, valoración o disponibilidad de deuda cambian	DSCR, vencimientos, necesidad de equity y valor de salida

Una tabla de sensibilidad muestra qué variable destruye el caso más rápido. Se revisan precio y fecha de energía, plazo de permisos, capital de conexión, fecha de equipos, utilización, tarifa, concentración de clientes, consumo térmico y costos de deuda. Las variables relacionadas se modelan juntas: un retraso puede aumentar intereses y CAPEX, desplazar ingresos y activar una penalidad. No es suficiente variar una sola celda si varios riesgos se mueven con una misma causa.

De una dependencia física a su impacto económico

El comité no asigna un valor universal a un MW ni a un minuto de interrupción. Primero identifica el producto, la tarifa, la utilización, la obligación de servicio, el cliente y el contrato; luego calcula el escenario con flujos de caja coherentes. Si no hay datos sólidos de probabilidad, se muestran escenarios de severidad y duración, no una falsa cifra esperada.

Para una tarifa fija de capacidad, una primera medida de exposición puede escribirse como:

MW de servicio expuestos = máximo entre cero y (MW comprometidos para el servicio − MW que el escenario permite entregar).

Ingreso de capacidad potencialmente expuesto = MW de servicio expuestos × tarifa contractual por MW y día × días afectados, únicamente cuando el contrato y la operación permiten que la indisponibilidad reduzca el cobro. Si existe una obligación

de pago durante la contingencia, el expediente informa por separado el derecho contractual de cobro y el incumplimiento físico/SLA. Los cargos variables por consumo, cross-connect o cómputo siguen su propia unidad y regla de facturación.

Efecto	Cómo estimarlo	Control para evitar una conclusión engañosa
Retraso de energización o aceptación	Días de demora, costos de mantener capital y fecha desplazada de inicio de cobro	No imputar pérdida de ingresos antes del hito contractual previsto
Capacidad de servicio expuesta	MW que no sobreviven al escenario por duración y tarifa/ margen aplicable	Aplicar condiciones reales de continuidad, créditos y suspensión de cobro
Créditos SLA y cargos	Cláusulas, umbrales, topes, exclusiones y agregación mensual	No sumar el crédito y la misma factura perdida dos veces
Recuperación y operación degradada	Reparación, fibra, energía temporal, personal, combustible, transporte y horas extra	Separar costos únicos, recurrentes y reembolsables
CAPEX de mitigación	Nueva ruta, ducto, subestación, protección, repuestos o rediseño	Comparar inversión, plazo, vida útil y capacidad que efectivamente protege
Cliente, refinanciamiento y salida	Escenarios de reducción, terminación, renovación y mayor tasa de riesgo	Cambiar los flujos y supuestos de valoración; evitar un descuento adicional duplicado

El resultado de cada escenario se expresa como diferencia entre flujos base y flujos afectados, con una fecha de valoración, moneda, impuestos, tasa y horizonte declarados. Se informa por separado ingreso bruto, margen de contribución, créditos, gastos de recuperación, capital adicional y valor residual. No se cuentan simultáneamente el ingreso completo perdido y su margen como

dos pérdidas distintas. Tampoco se convierte una correlación técnica en probabilidad financiera sin datos que la respalden.

Una brecha puede ser financiable si se mitiga, se transfiere por contrato o se acepta con reserva suficiente. La decisión debe nombrar al responsable, presupuesto, fecha, prueba de cierre y autoridad que acepta el riesgo residual.

Condiciones precedentes y puertas para autorizar capital

Cada desembolso se asocia a hitos que reducen incertidumbre. Una condición precedente debe indicar documento, estándar de suficiencia, responsable, autoridad aprobadora, fecha, presupuesto y consecuencia si no se cumple. La condición no debe escribirse como “obtener conectividad adecuada”; debe especificar qué rutas, contratos, mediciones, capacidad y evidencia satisfacen la decisión.

01

1. Demanda y contratos

EVIDENCIA MÍNIMA PARA DECISIÓN

Cliente, crédito, uso, capacidad, calendario, precio y concentración

SI FALLA, EL COMITÉ PUEDE...

Reducir fase, buscar cliente alternativo o conservar opción

02

2. Terreno, derechos y permisos

EVIDENCIA MÍNIMA PARA DECISIÓN

Control de sitio, accesos, servidumbres, permisos y expansión

SI FALLA, EL COMITÉ PUEDE...

Detener adquisición, renegociar o mover emplazamiento

03

3. Energía

EVIDENCIA MÍNIMA PARA DECISIÓN

Hitos de conexión, costo, suministro, firmeza y fecha

SI FALLA, EL COMITÉ PUEDE...

Reprogramar, asegurar alternativa o descartar MW especulativos

04	**4. Conectividad** EVIDENCIA MÍNIMA PARA DECISIÓN Rutas físicas, operadores, capacidad, latencia y contingencia SI FALLA, EL COMITÉ PUEDE... Incluir obra, nueva ruta, plazo o condición contractual
05	**5. Diseño y modelo operativo** EVIDENCIA MÍNIMA PARA DECISIÓN Carga, refrigeración, agua, clima, seguridad, personal y pruebas SI FALLA, EL COMITÉ PUEDE... Rediseñar, reducir carga o cerrar brechas operativas
06	**6. Construcción y commissioning** EVIDENCIA MÍNIMA PARA DECISIÓN CAPEX, equipos, cronograma, interfaces y aceptación SI FALLA, EL COMITÉ PUEDE... Recontratar, aportar contingencia o dividir fases
07	**7. Retorno, financiación y salida** EVIDENCIA MÍNIMA PARA DECISIÓN Contratos, OPEX, caja, deuda, sensibilidades y valor residual SI FALLA, EL COMITÉ PUEDE... Cambiar precio, capital, deuda, calendario o detener

Los defectos críticos no se compensan promediando un puntaje alto en otras áreas. Si el terreno no puede usarse legalmente, si la energía no llega en la fecha que exige el contrato o si no hay acceso de fibra físicamente desplegable, la recomendación debe reflejar el bloqueo aunque la demanda parezca atractiva.

Del retorno en papel a un activo operable

El valor de salida depende de la capacidad que un comprador pueda verificar, continuar y adaptar. Un data room de venta o refinanciamiento conserva contratos y derechos, as-built, inspecciones, mediciones, pruebas, permisos, inventarios, incidencias, mantenimiento, seguros, obligaciones ambientales y proyección de renovación de equipos. La transferencia incluye

capacitación, acceso a herramientas, datos, claves en un proceso seguro, personal, contratos y plan de continuidad.

La obsolescencia tecnológica se analiza en dos horizontes: facility y IT. El edificio puede durar décadas mientras aceleradores, redes, almacenamiento y densidad cambian en pocos años. La arquitectura necesita espacio, potencia, refrigeración, carga estructural, rutas, fibra y capacidad de retirar equipos. El activo mantiene valor si puede alojar la siguiente generación sin rehacer todo su territorio o interrumpir a sus clientes.

Resolución del caso conductor: 500 MW anunciados no equivalen a 500 MW facturables

Expediente hipotético H-FID, fecha de corte de diligencia. El caso tiene un diseño de cinco bloques y un escenario financiero con fechas y ocupación proyectadas. Sin embargo, no se han aportado título verificado, permisos completos, acuerdo de potencia firme, rutas independientes acreditadas, pruebas de carga integradas ni contratos ejecutables. Por tanto, el expediente no demuestra hoy ningún MW IT energizado o facturable. Ese cero no niega el potencial conceptual: indica falta de prueba, que es justamente lo que debe resolver el inversionista.

La tabla siguiente separa dos planos que jamás deben sumarse: el plano físico-contractual acreditado a la fecha de corte (todos los estados permanecen condicionados o no demostrados) y la simulación a plena madurez (los cinco bloques habrían alcanzado 500 MW IT aceptados y 475 MW potencialmente facturables con ocupación de 95 %, solo si todas las condiciones se cumplen). El importe facturado y la caja cobrada quedan sin demostrar, pues dependen de contratos, hitos, facturación y pago efectivos.

Frente	Estado a fecha de corte	Condición para la próxima liberación de capital
Demanda	LOI no vinculante; 0 MW contratados firmes	Contrato, tarifa, solvencia y obligación de compra

Frente	Estado a fecha de corte	Condición para la próxima liberación de capital
Terreno y permisos	En investigación	Dominio del sitio, geotecnia, accesos y autorizaciones
Conexión eléctrica	0 MW de potencia firme acreditada	Estudio, contrato, obras, MW/MVA y fechas verificadas
Rutas / MMR	Diversidad no demostrada	GIS, servidumbres, contrato, inspección y failover
Capacidad IT y térmica	0 MW IT aceptados	Prueba por bloque: energía, calor, seguridad y recuperación
Resultado comercial	0 MW con hito probado de facturación	Contrato vigente, aceptación y condición de cobro
Retorno de capital	VAN base negativo bajo supuestos	Revalidar CAPEX, tarifa, fases, deuda y sensibilidad

Mapa de capacidad por bloque: proyección frente a realidad acreditada

El mismo concepto se aplica cinco veces. Los valores de utilización ilustran una curva comercial hipotética y son distintos del estado del expediente de diligencia. No convierta las cifras de la derecha en capacidad disponible mientras faltan autorizaciones, contratos, pruebas y puesta en servicio.

Bloque	Aceptación proyectada	MW IT proyectados aceptados	MW facturables proyectados al 95 %	MW demostrados hoy
H-1	Año 2	100	95	0
H-2	Año 3	100	95	0
H-3	Año 4	100	95	0
H-4	Año 5	100	95	0
H-5	Año 6	100	95	0
TOTAL	Condicionado	500	475	0

Decisión del comité de inversión (caso H-FID). Mantener una opción condicionada, con un presupuesto limitado para diligencia técnica, jurídica, comercial y financiera. No autorizar la construcción irreversible del campus completo: faltan siete puertas suficientemente cerradas y el VAN base es inferior al umbral del 10 %. Puede evaluarse la primera fase una vez que un comprador firme capacidad compatible con 100 MW IT, la conexión tenga fecha y costo comprometidos, el sitio y las rutas estén habilitados, la ingeniería térmica y de seguridad esté probada a nivel de diseño y un nuevo caso financiero alcance los covenants y retorno exigidos. Cada liberación tendrá documento, emisor, autoridad, costo, fecha y consecuencia de incumplimiento.

Preguntas de aplicación

1. ¿Cuántos MW están demostrados, utilizables, conectados y contractualmente facturables a la fecha de corte, y qué dependencia puede reducir ese resultado?
2. ¿Qué dependencia podría impedir la facturación aunque exista potencia conectada?
3. ¿Qué documento físico y condición contractual respaldan los MW facturables al corte?

Práctica de dominio

Para un campus hipotético, clasifique un bloque anunciado según la escalera y complete la auditoría de bancabilidad: MW demostrables, dependencias expuestas e impacto económico. Simule la pérdida de un corredor de fibra y un retraso de potencia; calcule capacidad sobreviviente, duración, factura potencialmente expuesta, créditos y costo de recuperación con supuestos explícitos. Termine con tres condiciones precedentes y su evidencia antes del siguiente desembolso.

Decisión de diseño. El memorando final debe contestar en una página: cuántos MW están demostrados, utilizables y conectados para el cliente; cuántos cumplen hoy las condiciones contractuales de

facturación; qué dependencias podrían retirarlos o degradarlos; qué importe, margen y calendario quedarían expuestos; qué retorno producen el escenario base y los escenarios de falla; y qué condición impide comprometer capital hoy. Debe separar MW facturados y caja cobrada. Si faltan frontera, fecha o evidencia, el resultado se declara condicionado, no se infiere.

Toolkit de campo

Atlas de infraestructura y conectividad de campo

El atlas convierte conceptos de ingeniería en fichas de inspección. Cada ficha se completa con el plano del proyecto, el criterio de aceptación y la evidencia que recibirá operaciones.

Ficha	Qué revisar	Evidencia mínima
Fiber Ready	Acceso al sitio, rutas, diversidad, operadores y calendario	Data room de conectividad y brechas cerradas
Ruta OSP	Ductos, cámaras, cruces, servidumbres y entradas	As-built, recorrido de campo y riesgos compartidos
MMR y ODF	Demarcación, paneles, puertos, accesos y capacidad	Inventario de puertos y esquema de conexiones
Patch y limpieza	Conectores, etiquetas, radios y control de cambios	Registro de inspección, limpieza y patching
Pérdida y reflectancia	Presupuesto óptico, pérdidas por tramo y margen	Medición de extremo a extremo bajo método acordado
OTDR	Longitud, empalmes, eventos, parámetros y dirección	Trazas nativas y línea base aprobada
Dark fiber o wavelength	Control del activo, equipo, demarcación y reparación	Contrato, ruta y responsabilidades documentadas
DWDM y óptica coherente	Capacidad por canal, espectro, compatibilidad y crecimiento	Plan de canales y pruebas del servicio contratado
DCI	RTT, pérdida, capacidad sobreviviente y protección	Mediciones por extremos y prueba de contingencia

Ficha	Qué revisar	Evidencia mínima
Latencia	Destino, RTT por percentil, ventana y carga	Serie de mediciones reproducible
Site Ready	Suelo, amenazas, accesos, logística y expansión	Estudios, permisos y plan maestro
Power Ready	Capacidad, calendario, ruta al rack y respaldo	Estudios, unifilar, pruebas y autonomía
Cooling Ready	Carga térmica, distribución, controles y contingencia	Balance por zona, tendencias y pruebas de falla
Protección	Acceso, incendio, agua, tierra y alarmas	Planos, matrices causa-efecto y registros de prueba
Operación	Alarmas, procedimientos, capacidad y mantenimiento	SOP/MOP/EOP, responsables y sistema de registro
Commissioning	Pruebas físicas, ópticas, lógicas y operacionales	Matriz de aceptación cerrada y firmada
Observabilidad	Alarmas, potencia óptica, errores y estado de rutas	Tablero, umbrales, responsables y escalamiento

La ficha no reemplaza el diseño detallado ni una norma aplicable. Sirve para que los equipos documenten lo que inspeccionaron, lo que midieron, qué encontraron y qué decisión tomaron.

A. Diagnóstico de las Siete Puertas de Viabilidad para selección de sitio

Marque cada puerta como **demostrada**, **condicionada**, **en investigación** o **no demostrada**. Añada fuente, fecha, responsable, riesgo residual y condición de cierre. Resuelva primero las condiciones de descarte; un puntaje no sustituye el juicio sobre una brecha crítica.

Puerta	Preguntas de due diligence	Evidencia mínima
DEMANDA Y CONTRATOS	¿Qué cliente, producto, capacidad y fecha respaldan esta fase?	Contrato, precio, hitos, solvencia y concentración
TERRENO, DERECHOS Y PERMISOS	¿Hay control, servidumbres, accesos y permisos para construir y reparar?	Títulos, inspección, derechos, estudios y matriz de permisos
ENERGÍA	¿Cuánta potencia llega, cuándo, a qué costo y hasta qué frontera?	Estudio, acuerdo, cronograma, costos, suministro y unifilar
CONECTIVIDAD	¿Qué rutas, operadores y destinos pueden activarse y qué comparten?	Trazados, derechos, recorridos, MMR y mediciones
DISEÑO Y MODELO OPERATIVO	¿El sitio soporta carga, agua, clima, seguridad y turnos previstos?	Diseño, balance, permisos, análisis de riesgos y plan de personal
CONSTRUCCIÓN Y COMMISSIONING	¿Qué costo, equipos, hitos y pruebas completan la fase?	Presupuesto, cronograma, contratos, contingencia y protocolo de aceptación
RETORNO, FINANCIACIÓN Y SALIDA	¿Qué flujo y estructura de capital sobreviven a los escenarios adversos?	Modelo, contratos, deuda, sensibilidades y valor residual

B. Preguntas para RFI RFP de conectividad

1. Identifique el punto exacto de demarcación y los activos incluidos en el servicio.
2. Describa la ruta física hasta el campus con el nivel de detalle permitido y declare las dependencias compartidas con otras ofertas.
3. Indique si cada tramo es propio, arrendado, compartido o provisto por un tercero.

4. Especifique capacidad comprometida, capacidad de expansión, límites de ráfaga y condiciones de sobreventa.
5. Defina RTT, percentiles, pérdida, jitter, método, extremos, ventana y condiciones de carga.
6. Describa la protección, los eventos que la activan, el tiempo de convergencia y el tráfico que sobrevive.
7. Identifique PoP, puntos de intercambio, accesos a nube y países o regiones alcanzables.
8. Declare mantenimiento programado, tiempos de reparación, escalamiento, notificación y créditos de SLA.
9. Entregue resultados de pruebas de fibra y servicio, planos conforme a obra y registros de puertos.
10. Describa el procedimiento para probar failover sin comprometer producción.
11. Indique qué información de riesgo compartido puede proporcionar y con qué mecanismo de confidencialidad.
12. Declare supuestos, exclusiones, fechas de validez y condiciones que cambiarían la oferta.

C. Pasaporte de fibra

Campos recomendados: identificador único; cliente y servicio; sitio de origen y destino; sala y rack; ODF y puerto; operador; contrato; cable y número de fibras; par o fibra asignada; tipo de fibra; longitud estimada y medida; conectores; empalmes; ruta lógica; ruta física; MMR de entrada; dominio A/B; elementos compartidos; presupuesto óptico; óptica instalada; potencia Tx/Rx; mediciones de pérdida y reflectancia; trazas OTDR; instrumento y calibración; fecha de aceptación; as-built asociado; último cambio; responsable; criticidad; estado operacional.

El pasaporte no debe incluir información sensible que no se necesita para operar. El acceso a coordenadas precisas, planos de ductos y datos de seguridad se controla por rol. La versión

operativa mantiene un vínculo al repositorio seguro que contiene la evidencia completa.

D. Matriz de aceptación

Requisito	Método	Criterio de aceptación	Evidencia	Responsable y estado
Ruta física A/B	As-built e inspección	Diseño aprobado	Plano, fotos y recorrido	Construcción · abierto/cerrado
Pérdida óptica	Fuente y medidor	Presupuesto del enlace	Informe por fibra y dirección	Integrador · abierto/cerrado
Firma de eventos	OTDR	Línea base aceptada	Trazas nativas y parámetros	Integrador · abierto/cerrado
RTT y pérdida	Agentes en extremos	SLO por servicio	Datos y metodología	NOC/cliente · abierto/cerrado
Capacidad	Generador y carga	Capacidad útil acordada	Resultado bajo condiciones	Carrier/cliente · abierto/cerrado
Failover	Corte controlado	Tiempo y tráfico tolerados	Cronología y alarmas	NOC/operación · abierto/cerrado
Transferencia	Revisión documental	Paquete completo	Acta, inventario y procedimientos	Operación · abierto/cerrado

E. Tablero operacional de infraestructura crítica

Un tablero útil integra tendencias del facility y del servicio digital sin esconder el origen de cada dato. Los umbrales deben aprobarse por carga, fabricante, diseño y contrato:

Indicador	Umbral o tendencia	Acción inicial
Potencia y respaldo	Desviación de carga, autonomía o estado A/B	Verificar fuente, distribución, reserva y mantenimiento
Margen térmico	Cambio en temperatura de entrada, caudal o capacidad disponible	Revisar carga, recirculación, sensores y planta de frío
Fuga, incendio o acceso	Alarma, dispositivo inhibido o evento no explicado	Aplicar secuencia autorizada, proteger personas y aislar el área
PUE	Tendencia con la misma frontera y período	Separar carga IT, clima, pérdidas y auxiliares antes de ajustar
Capacidad	Crecimiento de kW, racks, agua o rutas	Proyectar saturación y abrir plan de expansión
RTT p95/p99	Elevación sostenida respecto de línea base	Separar ruta, carga y procesamiento
Pérdida	Incremento por enlace o servicio	Revisar errores, congestión y cambios
Potencia óptica	Deriva fuera del margen definido	Inspeccionar conectores, empalmes y temperatura
Utilización	Tendencia hacia saturación normal o contingente	Validar expansión y capacidad sobreviviente
Estado A/B	Ruta alterna degradada o no disponible	Evitar mantenimiento simultáneo y escalar reparación

Indicador	Umbral o tendencia	Acción inicial
Tiempo de failover	Cambio respecto del objetivo	Revisar convergencia, alarmas y configuración
Documentación	Diferencia entre inventario y estado real	Congelar cambios no urgentes y reconciliar as-built

Los valores deben conservar unidad, ubicación del sensor, intervalo, calidad, marca de tiempo y fuente. Un dato sin contexto de medición puede inducir decisiones erróneas.

F. TRACE-DC y lista auditable de ruta y latencia

TRACE-DC™ organiza la evidencia para seguir una función desde el requisito hasta la prueba y su revalidación. La ficha se mantiene por servicio y por ruta. Los planos detallados, coordenadas, datos de seguridad y contratos se guardan en el repositorio controlado correspondiente; la ficha de operación incluye solo lo que cada rol necesita consultar.

Registro	Contenido mínimo	Cierre verificable
Servicio	Función, destinos, criticidad, SLO y propietario	Aprobación del dueño del servicio
Ruta y versión	Extremos, demarcaciones, ID, propietario y fecha	Diagrama y registro consistentes
Dependencias	Ductos, cámaras, cruces, PoP, terceros y riesgos compartidos	Declaración del operador y revisión de ingeniería
Plano lógico	Sesiones, prefijos, políticas relevantes y cambios	Configuración revisada y evidencia de control
Desempeño	RTT por percentil, pérdida, jitter, carga y capacidad	Datos reproducibles con extremos y ventana

Registro	Contenido mínimo	Cierre verificable
Contingencia	Evento ensayado, failover, tráfico perdido y capacidad remanente	Cronología, alarmas y resultado de la función
Vigencia	Fuente, responsable, fecha, supuestos y disparadores de revalidación	Registro actualizado y excepciones aprobadas
Riesgo residual	Impacto, medida temporal, autoridad y fecha límite	Aceptación explícita o acción cerrada

La lista de materiales de ruta y latencia (BOM, por sus siglas en inglés) complementa la ficha por servicio: divide el recorrido en segmentos comparables, evita sumar distancias incompatibles y permite rastrear cada estimación hasta su fuente.

El inventario se mantiene con un ciclo operativo, no como una fotografía anual. Cada fase deja un producto verificable:

Fase	Trabajo	Producto verificable
Medir	Definir extremos, reloj, intervalo, carga, clase, sentido y versión de ruta	Serie original con metadatos y controles de calidad
Analizar	Comparar p50/p95/p99, jitter, pérdida, utilización y eventos	Diagnóstico que separa propagación, colas, procesamiento y cambios
Gestionar	Asignar brechas, acción, dueño, prioridad, plazo y excepción	Registro de trabajo y decisión con fecha de cierre
Asegurar	Repetir la prueba tras cambio o incidente y demostrar recuperación	Línea base actualizada, resultado de failover y aprobación del servicio

Se revalida una línea base cuando cambia el carrier, la ruta, el punto de presencia, la política, el servicio, la capacidad, el equipo

de medición o el perfil de tráfico; también después de una reparación, migración, incidente o failover. El informe indica qué parte se mantuvo comparable y cuál cambió. Sin ese control, una serie extensa puede describir con precisión una ruta que ya no existe.

Segmento	Datos mínimos	Evidencia o control
Demarcación y acceso	Origen, destino, handoff, operador y medio	Diagrama de conexión y contrato
Ruta física	Longitud estimada o medida, tramo, titular y dependencia compartida	Trazado, levantamiento o declaración fechada
Transporte	Equipos, interfaces, protección, capacidad y puntos de regeneración	Diseño del servicio, configuración y pruebas
Latencia	Contribución esperada y observada, sentido, carga y percentiles	Método, agentes, serie de datos y límites
Incertidumbre	Supuesto, dato faltante, confianza y condición de cierre	Responsable, fecha y evidencia pendiente

G. Matriz RACI y registro de impacto

La siguiente matriz es un punto de partida. Cada proyecto asigna nombres, suplencias y autoridad formal, manteniendo una sola persona o rol con responsabilidad final (A) por actividad.

Actividad	A	R	C	I
Definir criticidad y SLO	Dueño del servicio	Arquitectura de red	Operaciones, seguridad	Carrier
Aceptar ruta y riesgo residual	Responsable del sitio	Ingeniería integradora, OSP	Carrier, seguridad, operaciones	Dueño del servicio

Actividad	A	R	C	I
Aprobar política BGP	Dueño de red	Ingeniería de red, carrier	Seguridad, operación	Dueño del servicio
Aceptar FAT/SAT y traspaso	Operaciones del centro	Integrador, carrier, NOC	Dueño del servicio, seguridad	Soporte
Aprobar cambio de ruta	Autoridad de cambios	Ejecutor OSP o red	Operaciones, servicio, seguridad	Interesados afectados
Coordinar incidente y recuperación	Dueño del servicio	NOC, carrier, operaciones	Seguridad, facility, ingeniería	Usuarios afectados

Para evaluar una falla, registra por separado el impacto del servicio, la degradación y el costo de restauración. La tabla evita atribuir un valor económico genérico a todos los minutos de interrupción.

Campo del incidente	Dato a registrar
Servicio y función afectada	Aplicación, destino, clase de tráfico y dueño
Tiempo funcional	Inicio, detección, conmutación, recuperación y cierre
Desempeño	RTT, pérdida, jitter, capacidad y estado SLO antes y durante el evento
Alcance	Usuarios, transacciones, producción o procesos interrumpidos
Costo directo	Trabajo de reparación, recuperación y operación extraordinaria
Supuestos económicos	Fuente de tasas, rango de estimación, partidas solapadas y exclusiones
Contrato	SLA, aviso, créditos y obligaciones de recuperación por separado

Campo del incidente	Dato a registrar
Aprobación	Responsable de negocio, responsable técnico y acciones pendientes

H. Glosario esencial

Infraestructura digital: conjunto coordinado de activos físicos, plataformas, acuerdos, capacidades y controles que permiten crear, transportar, procesar, almacenar, proteger y entregar información digital con un nivel acordado de servicio.

Digital public infrastructure (DPI): sistemas digitales compartidos para funciones públicas o de interés general, como identidad, pagos o intercambio de datos; no es sinónimo de infraestructura física digital.

MW energizado: potencia en una frontera definida que ha sido conectada, probada y autorizada para operar; no equivale automáticamente a MW IT contratables o facturables.

MW facturable: capacidad asociada a un producto cuya condición contractual de inicio de facturación se ha cumplido en una fecha de corte. Se informa separada de los MW físicamente disponibles, los importes facturados y la caja cobrada; los contratos pueden establecer otros hitos, incluidos pagos por reserva.

Anchor tenant: cliente principal cuya demanda o contrato puede respaldar una parte relevante de la fase inicial; su valor depende de la firmeza, plazo, solvencia y condiciones del acuerdo.

CAPEX: capital expenditure; inversión en activos, obras, equipos y habilitación, con criterios de inclusión y fecha de estimación declarados.

DSCR: Debt Service Coverage Ratio; relación entre el flujo de caja disponible para deuda y el servicio de deuda durante un período definido.

LOI: Letter of Intent; carta de intención. Su efecto depende de qué cláusulas sean vinculantes y qué condiciones sigan pendientes.

MW IT: potencia de carga IT medida en la frontera que declare el proyecto. Debe distinguirse de la potencia total de facility y de la capacidad de conexión.

OPEX: operational expenditure; costos recurrentes para operar, mantener y prestar el servicio, según fronteras contables declaradas.

RFS: Ready for Service; fecha o condición en que la capacidad queda lista para prestar el servicio contractual.

TIR: tasa interna de retorno de un flujo de caja y horizonte definidos; su interpretación depende de supuestos y estructura de capital.

VAN: valor actual neto de flujos descontados con una tasa y horizonte declarados.

BESS: Battery Energy Storage System; sistema de almacenamiento que combina baterías, conversión de potencia, protección, control y gestión térmica para prestar uno o más servicios eléctricos.

BMS: Building Management System; sistema de supervisión y control de servicios del edificio, con alcance definido por el proyecto.

Carrier: proveedor que presta transporte, acceso IP u otros servicios de conectividad. La palabra no implica propiedad de todos los activos usados.

CRAC: Computer Room Air Conditioner; unidad de climatización de precisión que suele utilizar expansión directa.

CRAH: Computer Room Air Handler; unidad que mueve aire a través de un serpentín alimentado habitualmente por agua helada.

AS_PATH: atributo de BGP que registra los sistemas autónomos que ha atravesado un anuncio de ruta. Describe una secuencia lógica, no el trazado físico completo.

BOM: Bill of Materials; lista trazable de elementos, segmentos y dependencias que componen un servicio.

Cross-connect: conexión física o lógica entre puertos o servicios dentro de una instalación de interconexión.

Dark fiber: fibra óptica instalada sin servicio de transmisión activo contratado como longitud de onda; el usuario puede aportar los equipos de iluminación según el acuerdo.

DCI: Data Center Interconnect; conjunto de enlaces y servicios que conecta centros de datos o campus.

DCIM: Data Center Infrastructure Management; funciones de inventario, espacio, activos y capacidad de infraestructura del centro de datos.

Demarcación: límite físico, lógico o contractual donde se entrega un servicio o cambia una responsabilidad.

EPMS: Electrical Power Monitoring System; sistema de supervisión y medición de la distribución eléctrica.

IX: Internet Exchange; infraestructura donde redes autónomas intercambian tráfico mediante acuerdos de peering.

MMR: Meet-Me Room; sala de interconexión donde operadores y clientes conectan sus redes.

OTDR: instrumento y método de reflectometría óptica en el dominio del tiempo, útil para caracterizar eventos y distancias en una fibra.

RACI: matriz de responsabilidades que identifica quién ejecuta (Responsible), quién responde finalmente (Accountable), a quién se consulta (Consulted) y quién recibe información (Informed).

ROA: Route Origin Authorization; autorización publicada en RPKI para asociar un prefijo IP con uno o más sistemas autónomos de origen permitidos.

ROV: Route Origin Validation; validación de origen de una ruta BGP frente a datos RPKI disponibles. No valida por sí sola la ruta física.

RTO: Recovery Time Objective; objetivo acordado para restablecer una función después de una interrupción.

Peering: intercambio directo de tráfico entre redes bajo una política y un acuerdo determinados.

PoP: Point of Presence; punto donde un proveedor instala equipos o habilita acceso a su red.

RTT: Round-Trip Time; tiempo de ida y vuelta entre extremos definidos.

SLA: compromiso contractual de servicio con métricas, método, exclusiones y consecuencias definidos.

SLO: objetivo interno de nivel de servicio usado para diseñar y operar una experiencia acordada.

SRLG: Shared Risk Link Group; grupo de enlaces que puede compartir un riesgo de falla común.

MTTD: Mean Time to Detect; tiempo medio entre el inicio de una falla y su detección, según el método de medición acordado.

MTTR: Mean Time to Repair; tiempo medio requerido para reparar un activo o servicio según los extremos definidos por el operador. El contrato debe precisar cuándo empieza y termina el conteo.

MOP: Method of Procedure; secuencia aprobada para ejecutar un cambio planificado, con controles, responsables, verificaciones y criterios de reversa.

EOP: Emergency Operating Procedure; procedimiento para responder a un evento anormal o de emergencia.

SOP: Standard Operating Procedure; procedimiento estándar para una tarea recurrente.

N+1: arquitectura que incorpora una unidad de capacidad adicional a la requerida para la carga, sin que el término por sí solo demuestre independencia de rutas.

2N: dos cadenas nominalmente completas de capacidad; el esquema requiere revisión de fallas comunes y de la carga que realmente puede usar ambas.

PUE: Power Usage Effectiveness; cociente entre energía total del centro de datos y energía de sus equipos IT durante un período y con límites de medición declarados.

WUE: Water Usage Effectiveness; indicador de uso de agua de un centro de datos cuya interpretación depende de fronteras, período y metodología publicados.

Throughput: tasa de datos útiles obtenida bajo un método y unas condiciones de prueba especificados.

AI Factory: plataforma integrada de cómputo, memoria, fabric, almacenamiento, software, potencia, refrigeración y operación diseñada para producir una salida de inteligencia artificial medible.

CDU: Coolant Distribution Unit; unidad que distribuye y controla un circuito de refrigeración líquida y puede separar el loop IT del loop de facility.

FID: Final Investment Decision; decisión de comprometer inversión de construcción según condiciones y evidencia aprobadas.

HBM: High Bandwidth Memory; memoria de alto ancho de banda integrada o próxima al acelerador, usada para alimentar operaciones de cómputo intensivo.

IRU: Indefeasible Right of Use; derecho contractual de uso de una infraestructura o capacidad durante un plazo y condiciones definidos.

RDMA: Remote Direct Memory Access; mecanismo para transferir datos entre memorias de equipos remotos con menor intervención de la CPU, sujeto a soporte y configuración.

RoCE: RDMA over Converged Ethernet; transporte de RDMA sobre Ethernet que exige diseño y operación coherentes de congestión, colas, buffers y telemetría.

TCS: Technology Cooling System; circuito de refrigeración que sirve directamente a equipos IT y se conecta al sistema de facility mediante interfaces definidas.

I. Lista de aceptación integrada del centro de datos

Esta lista organiza la entrega interdisciplinaria. Cada línea debe tener condición previa, método, instrumento o fuente de datos, testigo, resultado esperado, evidencia, desviación y criterio de cierre. Las pruebas se ejecutan mediante planes aprobados y por personal autorizado.

Dominio	Prueba o comprobación	Evidencia de salida
Terreno y edificio	Inspección de salas, estructura, penetraciones, drenajes, rutas de equipo y as-built	Planos conformes, listas de pendientes y aceptación de obra
Energía	Protecciones, secuencias, UPS/baterías, generadores, transferencia, distribución A/B y carga	Resultados registrados por modo, evento, circuito y condición de carga
Refrigeración	Caudal, control, sensores, alarmas, carga por zona, contingencia y recuperación	Tendencias, temperaturas en entradas, secuencias y capacidad comprobada
Telecomunicaciones	Certificación de cobre/fibra, presupuesto óptico, identificación, diversidad y conexión	Certificados, trazas nativas, planos, inventario y línea base
Seguridad y vida	Accesos, CCTV, detección, secuencias de incendio, drenaje y aviso de fugas	Matriz causa-efecto probada y registros de inspección
Monitoreo y automatización	Señales, marcas de tiempo, umbrales, alarmas, permisos y escalamiento	Punto a punto, roles, alarmas recibidas y acciones verificadas

Dominio	Prueba o comprobación	Evidencia de salida
Integración	Pérdida controlada de una dependencia y observación de efectos cruzados	Cronología conjunta, carga sobreviviente, recuperación y brechas
Operación	Procedimientos, turnos, repuestos, accesos, contactos y cambios	SOP/MOP/EOP aprobados, capacitación, acta y transferencia a operaciones

J. Caso integrador Campus Aurora

Este caso es ficticio y tiene fines formativos. Ninguna cifra, condición o decisión representa un proyecto real ni un benchmark de mercado. El lector debe proponer una recomendación usando la evidencia disponible, identificar lo que falta y explicar qué capital puede comprometerse antes del siguiente hito.

Expediente inicial

Un patrocinador evalúa un campus hipotético de 360 MW IT en tres bloques de 120 MW. Tiene una opción de compra de terreno por doce meses. La documentación inicial incluye:

1. Un estudio comercial identifica tres clientes potenciales, pero solo uno envió una carta de intención no vinculante por 80 MW, sujeta a precio, permisos y fecha de servicio.
2. El propietario muestra una respuesta preliminar de la utility que indica que podría estudiar 360 MW después de obras de red. No fija fecha, costo, alcance ni firmeza de suministro.
3. La zonificación parece compatible, aunque los estudios de título, geotecnia, drenaje y ruta de permisos no están cerrados.
4. Dos carriers entregan propuestas comerciales. Ambos utilizan la misma entrada de ductos durante parte del último tramo; no hay recorrido de campo ni declaración de SRLG.
5. El concepto térmico usa chillers enfriados por agua. La asignación de agua y el permiso de descarga están pendientes; no existe una alternativa de diseño comparada.

6. Una aproximación de aula para 360 MW a US$11 millones/MW sitúa el CAPEX de infraestructura en US$3.960 millones; la sensibilidad de US$8,6–12 millones/MW produce US$3.096–4.320 millones [68, 69]. No es presupuesto de proyecto y la base de MW debe normalizarse. La estimación disponible cubre edificio y planta principal; excluye conexión eléctrica externa, ductos de fibra, costos del propietario, financiación, impuestos, personal de operación, pruebas integradas, mitigaciones ambientales y equipos IT.
7. El borrador propone redundancia eléctrica, pero no describe capacidad sobreviviente ni prueba integrada. El operador todavía no está seleccionado.

Encargo al lector

1. Defina qué significa 360 MW IT en este expediente y qué cifras aún no están demostradas.
2. Clasifique las siete puertas; cite evidencia y no confunda afirmaciones con compromisos.
3. Identifique cinco dependencias que puedan retrasar la fecha de servicio y qué prueba reduce cada incertidumbre.
4. Proponga una estrategia de fases y las condiciones precedentes para pasar del gasto de estudios a la construcción.
5. Dibuje las rutas de energía y conectividad a nivel de dominios, marque elementos compartidos y escriba un plan de pruebas.
6. Prepare escenarios base y adverso; indique qué variables cambian la decisión y cuánto capital queda expuesto.
7. Redacte un memorando de inversión de una página con recomendación, condiciones, responsables y próximo hito.

Guía de análisis

01 **Demanda e ingresos**

ESTADO INICIAL SUGERIDO

Condicionada

QUÉ RESOLVER ANTES DEL HITO DE CONSTRUCCIÓN

Convertir la carta de intención en requisitos, precio, fecha, potencia, garantías y contrato ejecutable

---

02 **Terreno y permisos**

ESTADO INICIAL SUGERIDO

En investigación

QUÉ RESOLVER ANTES DEL HITO DE CONSTRUCCIÓN

Validar título, derecho de acceso, geotecnia, riesgos, zonificación y calendario de aprobaciones

---

03 **Energía**

ESTADO INICIAL SUGERIDO

No demostrada para el calendario del caso

QUÉ RESOLVER ANTES DEL HITO DE CONSTRUCCIÓN

Obtener estudios, obras, costo, capacidad por fase, fecha vinculante y responsabilidad por retraso

---

04 **Conectividad**

ESTADO INICIAL SUGERIDO

Condicionada con riesgo de ruta compartida

QUÉ RESOLVER ANTES DEL HITO DE CONSTRUCCIÓN

Recorrer entradas, mapear ductos, negociar derechos y probar independencia física y operacional

---

05 **Refrigeración, agua y clima**

ESTADO INICIAL SUGERIDO

En investigación

QUÉ RESOLVER ANTES DEL HITO DE CONSTRUCCIÓN

Asegurar recurso y permisos; comparar alternativa de refrigeración y modo degradado

---

06	**Capital y entrega** ESTADO INICIAL SUGERIDO No demostrada en costo completo QUÉ RESOLVER ANTES DEL HITO DE CONSTRUCCIÓN Completar presupuesto, contingencia, financiación, suministros, contratos e interfaces
07	**Operación y resiliencia** ESTADO INICIAL SUGERIDO No demostrada QUÉ RESOLVER ANTES DEL HITO DE CONSTRUCCIÓN Seleccionar operador, definir staffing, procedimientos, pruebas, aceptación y traspaso

La recomendación prudente es financiar una fase acotada de diligencia y mantener la opción del terreno si sus términos permiten cerrar evidencia crítica. El expediente no justifica todavía autorizar la construcción completa: potencia, demanda, costos, permisos, agua, diversidad de fibra y operación conservan incertidumbres materiales. Esta conclusión puede cambiar si llegan compromisos vinculantes y pruebas suficientes.

El estudiante debe separar los gastos reversibles para obtener evidencia de las obligaciones que hacen difícil salir. Debe cuantificar el costo de esperar, el costo de cerrar la brecha y el riesgo de perder el sitio. Una recomendación de avanzar con condiciones debe nombrar quién verifica cada condición, cuándo vence y qué pasa si no se cumple.

K. Autoevaluación de competencias para dirigir un centro de datos

Califique cada capacidad de 0 a 3: **0** no puedo explicarla; **1** la explico con ayuda; **2** puedo analizarla con evidencia; **3** puedo conducir una revisión, documentar la decisión y enseñar el método a otra persona. La puntuación es una guía de aprendizaje, no una certificación.

Capacidad	Evidencia propia	Puntuación 0–3	Próxima práctica
Entender el modelo de negocio y las fronteras del activo	Mapa de activos, servicios y contratos		
Evaluar las Siete Puertas de Viabilidad	Matriz con fuente y responsable por afirmación		
Modelar capacidad, calendario, ingresos y costos	Modelo con escenarios y supuestos visibles		
Coordinar energía, refrigeración, agua, seguridad y espacio	Matriz de interfaces y riesgos comunes		
Demostrar conectividad física y lógica	Trazado, mediciones, contratos y failover		
Diseñar aceptación y commissioning	Plan, criterio de éxito, evidencia y cierre		
Operar, medir y aprender de incidentes	Tablero, procedimiento y registro de acciones		

Capacidad	Evidencia propia	Puntuación 0–3	Próxima práctica
Comunicar una decisión a dirección e inversión	Memorando breve, claro y auditable		
Dirigir personas, turnos y proveedores	Turnos, competencias, suplencias y proveedores evaluados		
Gobernar incidentes y recuperación	Autoridad, simulacros, alertas, respuesta y acciones cerradas		
Integrar seguridad, cumplimiento y riesgo digital	Controles, incidentes, riesgos y plazos		

Una puntuación baja señala el siguiente capítulo o práctica. Una puntuación alta requiere un artefacto que otra persona pueda revisar. La competencia se demuestra con el trabajo, no con la cantidad de siglas memorizadas.

L. Plantilla de memorando de inversión

Oportunidad: nombre genérico, ubicación y tipo de activo.

Decisión solicitada: monto, fase, plazo y autoridad.

Cliente y producto: segmento, requisitos, capacidad, precio y evidencia comercial.

Activo y capacidad: terreno, derechos, MW de conexión, potencia comprometida, carga IT, capacidad vendible y fase.

Siete Puertas: estado, evidencia, responsable y brecha por cada una.

Economía: CAPEX/OPEX, fuentes de ingresos, financiación, VAN/TIR/DSCR si aplican y supuestos.

Escenarios: base, adverso y favorable; sensibilidad principal y costo de demora.

Riesgos materiales: energía, permisos, agua/clima, conectividad, construcción, suministro, comunidad, operación y cliente.

Condiciones precedentes: pruebas, contratos, permisos, hitos y responsables.

Recomendación: avanzar, avanzar sujeto a condiciones, mantener opcionalidad, rediseñar o detener.

Próximo hito: fecha, evidencia de cierre, costo máximo expuesto y autoridad de decisión.

M. Five Readiness para un cribado de emplazamiento

Use esta hoja antes de puntuar terrenos o encargar ingeniería. Cada resultado debe incluir fuente, fecha, responsable y siguiente prueba. Un bloqueo crítico manda la oportunidad a investigación aunque otros campos estén completos.

Dimensión	Evidencia inicial	Estado	Brecha y siguiente acción
Site	Derechos del terreno, geotecnia, amenazas, accesos y expansión	Demostrada / condicionada / en investigación / no demostrada	
Power	Estudio de conexión, capacidad, fecha y obras aguas arriba	Demostrada / condicionada / en investigación / no demostrada	
Fiber	Dos o más rutas candidatas, operadores, ductos y punto de entrega	Demostrada / condicionada / en investigación / no demostrada	
Permit	Zonificación, permisos, calendario y dependencias de terceros	Demostrada / condicionada / en investigación / no demostrada	
Market	Cliente, producto, carga, fecha y precio defendibles	Demostrada / condicionada / en investigación / no demostrada	

El filtro no genera una nota única que oculte una fatal flaw. Después del cribado, se desarrolla la evaluación completa de las Siete Puertas.

N. Fiber Readiness Score para due diligence de conectividad

Puntúe cada eje de 0 a 2: **0** sin evidencia suficiente; **1** evidencia parcial o condicionada; **2** evidencia revisada y utilizable para la fase. La suma organiza el trabajo, pero no equivale a una certificación ni permite promediar una falla crítica.

La tabla de los nueve ejes continúa en la página siguiente.

N Nueve ejes de conectividad

Evalúe una fase, un servicio y una fecha de corte. Registre evidencia, fuente y validador por eje. El máximo aritmético es 18; un campo sin evaluar permanece pendiente.

Eje	0 a 2	Evidencia que se examina
A Acceso al sitio		Rutas, ductos, derechos y permisos; acceso realizable del operador.
B Diversidad física		Trazados, cámaras, cruces, puentes, entradas y riesgos compartidos.
C Oferta de carriers		Operadores, presencia, capacidad, modelo de servicio y terceros.
D Conexión del campus		Entrada, MMR, ODF, canalizaciones y recorridos interiores.
E Capacidad y expansión		Fibras, ópticas, puertos, servicios y fases de crecimiento.
F Desempeño		Latencia, pérdida, variación, throughput, extremos y método.
G Contratos y demarcación		Obligaciones, reparación, exclusiones, límites y fecha de servicio.
H Operación y reparación		Personal, acceso, repuestos, mantenimiento, escalamiento y ensayos.
I Seguridad documental		Planos vigentes, inventario y acceso controlado a la información.

Puntuación: 0, soporte insuficiente en el expediente; 1, evidencia parcial o condicionada; 2, antecedente revisado y utilizable para la fase. El cero no demuestra inexistencia física.

Los rangos siguientes son orientaciones del autor, sin validación estadística ni carácter de certificación. Las condiciones críticas se comprueban antes de interpretar la suma. La versión editable conserva fuente, fecha, responsable y cierre.

Interpretación de trabajo: 0–6 requiere diligencia básica antes de comparar; 7–12 puede justificar diseño preliminar con condiciones; 13–18 indica una base documental más madura, sujeta a las puertas críticas y pruebas. Si la diversidad física es requisito contractual y sigue sin demostrarse, el sitio no está listo para una decisión que dependa de ella, aunque la suma total sea alta.

O. Veintiuna decisiones antes de la decisión final de inversión

La lista organiza las condiciones que el comité debe cerrar o aceptar expresamente antes de comprometer capital irreversible. El responsable financiero ajusta el hito al tipo de desarrollo, adquisición o expansión.

N.º	Decisión	Evidencia mínima para cerrar o aceptar el riesgo
1	Qué producto y cliente sostienen la fase	Requisito, contrato o cartera comercial con estado y fecha
2	Qué carga se va a alojar y con qué criticidad	Perfil IT, densidad, servicio, SLO, crecimiento y modo degradado
3	Qué significa la cifra de MW publicada	Frontera: conexión, campus, facility, crítica o MW IT
4	Qué potencia se puede energizar y cuándo	Estudio, acuerdo, obras, hitos y fecha con grado de firmeza
5	Qué cuesta poner potencia en el sitio	Conexión, subestación, transformación, protecciones, combustible y respaldo
6	Qué necesita el terreno para ser construible	Título, geotecnia, amenazas, acceso, drenaje y logística
7	Qué permisos y consultas son ruta crítica	Matriz de permisos, dueño, calendario, condición y autoridad

N.º	Decisión	Evidencia mínima para cerrar o aceptar el riesgo
8	Qué solución térmica soporta la carga contratada	Balance por zona, envolvente, capacidad de CDU/planta y contingencia
9	Qué agua, descarga y clima puede sostener la operación	Fuente, permisos, calidad, estacionalidad, consumo y plan alternativo
10	Qué conectividad puede venderse desde el primer día	Carriers, MMR, accesos, RFS, capacidad y rutas verificadas
11	Qué diversidad es real bajo escenarios de falla	Trazado, inspección, SRLG, capacidad sobreviviente y prueba
12	Qué tecnología de AI fabric y storage encaja en la misión	Workload, topología, interfaces, rendimiento y soporte
13	Qué CAPEX/OPEX está dentro y fuera del presupuesto	Coste completo, contingencias, owner's costs, impuestos y servicios
14	Qué suministros y contratos fijan el calendario	Transformadores, generadores, UPS, chillers, CDUs, fibra y ópticas
15	Qué riesgo energético y ambiental queda tras contratos	Perfil físico, PPA, combustible, emisiones, agua y escenarios
16	Quién diseña, construye, integra y acepta	RACI, interfaces, garantías, criterios, autoridad y escalamiento
17	Quién opera el activo a cada hora	Staffing, entrenamiento, SOP/MOP/EOP, NOC, facility y contratos
18	Qué pruebas habilitan la entrada en servicio	FAT/SAT, commissioning, pruebas integradas y aceptación de carga

N.º	Decisión	Evidencia mínima para cerrar o aceptar el riesgo
19	Qué fallas quedan fuera del diseño o del SLA	Registro de riesgo, impacto, mitigación y autoridad que acepta
20	Cómo se expande o repotencia el activo	Fases, capacidad reservada, rutas, permisos y restricciones de retiro
21	Cuánto capital queda expuesto si el hito falla	Condiciones precedentes, costo de salida, fecha límite y decisión de detener

Decida avanzar, condicionar, mantener opción, rediseñar o detener, con responsable, evidencia, fecha y efecto para cada condición.

P. Matriz de inversión y condiciones precedentes

Use una fila por puerta para convertir una declaración del promotor en una condición verificable. Registre fuente, emisor, versión, fecha de vigencia, responsable y efecto si la evidencia falta. Los estados son demostrado, condicionado, en investigación o no demostrado.

Puerta	Evidencia y fecha	Responsable	Estado, exposición y decisión
1. Demanda y contratos			
2. Terreno, derechos y permisos			
3. Energía			
4. Conectividad			
5. Diseño y operación			
6. Construcción y commissioning			
7. Retorno, financiación y salida			

Una condición precedente debe indicar el documento o prueba exigido, un estándar de suficiencia, la persona que valida, una fecha, un presupuesto y la consecuencia de incumplir. Las condiciones críticas se elevan al comité; no se diluyen en una puntuación promedio.

Q. Ficha de análisis de incidente de extremo a extremo

Campo	Registro del incidente
Identificador, servicio y severidad	
Fecha, zona horaria, detección y declaración	
Causa inmediata y nivel de confianza	
Condición física, lógica, humana o ambiental	
Activos, rutas, proveedores y dominios afectados	
Dependencia compartida o fallo de causa común	
Clientes, funciones y datos impactados	
Cronología: detectar, contener, conmutar, recuperar, reparar, validar y cerrar	
Capacidad y servicio que sobrevivieron	
Evidencia original, huecos, relojes y fuentes	
Decisiones, autoridad, comunicación y escalamiento	

Campo	Registro del incidente
Causa contribuyente y control que falló o funcionó	
Acción correctiva, dueño, presupuesto y fecha	
Prueba de eficacia y criterio de cierre	
Riesgo residual aceptado por y hasta cuándo	

Cierre la acción solo tras verificar instalación y prueba, y actualizar inventario, rutas, riesgos y procedimientos.

R. Auditoría de bancabilidad del MW facturable

Complete una fila por bloque homogéneo de capacidad, producto y fecha. No mezcle potencia de conexión, MW de facility, MW IT, pagos por reserva, cargos por consumo, importes facturados y caja cobrada. Si un contrato permite facturar antes de la entrega física, registre ambos estados y la obligación de servicio.

Bloque y métrica	MW, frontera y fecha	Evidencia física, ruta y dominio común	Contrato, hito de cobro y estado

Para cada fila registre estado como demostrado, condicionado, en investigación o no demostrado. Cite emisor, versión, fecha, vencimiento y responsable de verificar. Indique si la cifra está medida, calculada, modelada o declarada; no convierta un anuncio en evidencia física. Las relaciones contractuales pueden adelantarse o atrasarse respecto de la obra, por lo que sus estados se documentan en paralelo.

Escenario	Capacidad y duración	Ingreso o crédito expuesto	Recuperación, ΔNPV y acción
Base contractual y operativo			
Retraso de potencia o commissioning			
Pérdida de ruta o dominio común			
Reducción o salida del cliente ancla			

El informe de cierre presenta tres conclusiones con respaldo: **MW demostrables**, **dependencias expuestas** e **impacto económico**. En el último, separa retraso, ingreso/margen, créditos SLA, OPEX de contingencia, CAPEX de recuperación y valor de salida; revisa que no haya doble conteo. Una probabilidad solo se usa con datos y método defendibles. Si no existe, se presenta sensibilidad por escenarios.

Decisión del comité: avanzar, avanzar sujeto a condiciones, mantener opción, rediseñar o detener. Toda condición debe tener documento o prueba, dueño, presupuesto, fecha, estándar de aceptación y autoridad para aprobar el cierre.

S. Mandato tablero y agenda del director del centro de datos

Use esta ficha para conducir la revisión mensual de un sitio, una región o una cartera. Complete el alcance, las unidades, las fechas y las fuentes antes de comparar métricas. Adapte los responsables a la estructura local y mantenga la autoridad de parada y los límites técnicos aprobados.

Activo / región: _____ **Periodo:** _____
Fecha de corte: _____

Resumen ejecutivo: servicio entregado, capacidad demostrable, resultado económico, riesgo principal y decisiones solicitadas.

Dimensión	Estado, tendencia y fuente	Decisión, responsable y fecha
Clientes, contratos y SLA		
MW por estado y fecha		
Potencia, refrigeración y agua		

Dimensión	Estado, tendencia y fuente	Decisión, responsable y fecha
Facility, mantenimiento y commissioning		
Conectividad, latencia y rutas compartidas		
CAPEX, OPEX, energía, ingresos y caja		
Seguridad, cumplimiento e incidentes		
Personas, turnos, habilitaciones y proveedores		
Riesgos principales y mitigación financiada		

Decisiones del director:

Decisión	Evidencia necesaria	Autoridad que aprueba	Dueño	Fecha límite	Criterio de cierre

Reglas de uso

- Registrar cada indicador con unidad, frontera, periodo, fuente y responsable; separar MW eléctricos, facility e IT, capacidad contratada o facturable, importe facturado y caja cobrada.

- Comparar SLA y eficiencia dentro de su contrato y periodo medido. Cada desviación o excepción de seguridad, cumplimiento o redundancia debe registrar impacto, autoridad, mitigación, dueño y fecha; cerrar con decisiones y comunicar degradaciones materiales con prontitud.

T. Hoja de conciliación del caso Campus Horizonte

Esta ficha acompaña el modelo integral del capítulo 7 y la resolución del capítulo 26. Para reproducirlo, abra una hoja con años 0–20 en columnas y bloques H-1 a H-5 en filas, e introduzca las condiciones por separado. El cálculo debe vincularse al documento que sustente cada fecha, precio y obligación; las celdas del ejercicio son supuestos de aprendizaje.

CAPEX por bloque = 100 MW × US$11 millones/MW = US$1.100 millones; distribución 35 % en el año de inicio previsto menos 2 y 65 % en el año menos 1. MW facturables de cada bloque en año t = 100 × factor(t − año de aceptación), con factores 0 / 50 % / 75 % / 90 % / 95 % en años anteriores a aceptación / año 0 / año 1 / año 2 / año 3 en adelante.

Ingreso anual = MW facturables × tarifa mensual (US$/kW-mes) × 0,012, expresado en millones de US$. EBITDA = ingresos de capacidad − 28 millones por bloque activo − 0,22 millones por MW facturable. Sustituciones = 22 millones por bloque activo. Depreciación didáctica = CAPEX inicial de cada bloque / 20 años después de la aceptación. Impuesto no apalancado = 27 % × máximo(0, EBITDA − depreciación). FCFF = EBITDA − impuestos no apalancados − sustituciones − CAPEX de obra.

Deuda nueva = 45 % del desembolso de CAPEX anual; la deuda capitaliza interés al 7 % en años 0–5. Desde el año 6 hasta 20, amortiza una quinceava parte del saldo al cierre del año 5 y paga interés al 7 % sobre saldo inicial del año. Impuesto apalancado = 27 % × máximo(0, EBITDA − depreciación − interés pagado). CFADS = EBITDA − impuesto apalancado − sustituciones. DSCR = CFADS / (interés pagado + amortización). Flujo al accionista = CFADS −

servicio de deuda − aporte de equity; agregar valor terminal solo al año 20.

Valor terminal didáctico = 8 × EBITDA del año 20. VAN a 10 % = suma de FCFF de cada año descontado al año 0 (el terminal solo en año 20). TIR no apalancada = tasa que hace VAN=0 para esos FCFF. No se calculan pérdidas fiscales arrastrables, IVA, cuentas por cobrar, reajustes, inflación, repotenciación tecnológica ni comisiones, que un modelo de inversión real debe incorporar. No confundir flujo de empresa y flujo del accionista, ni sumar en el mismo cálculo deuda y FCFF no apalancado.

Control de evidencia: por cada entrada del modelo complete emisor, documento, fecha, unidad, frontera, versión, validador, estado, vigencia y escenario. El registro económico debe conciliarse con MW físicamente probados, obligaciones contractuales y caja recibida; cualquier diferencia se muestra como brecha, no se compensa con supuestos de mercado.

U Aplicación documental a una vía de conexión en Chile

El caso NUP 7459 permite aplicar el método a una secuencia pública de actuaciones. Se examinan cinco comunicaciones originales conservadas por el Coordinador Eléctrico Nacional, con corte de consulta de 8 de noviembre de 2026. La selección es acotada: no representa el expediente completo, los contratos del campus ni su desarrollo posterior.

El objeto es una solicitud vinculada con una obra de transmisión para el proyecto Data Center Huechuraba. El cierre de esa solicitud no equivale a cancelar el campus. Las afirmaciones del promotor, las actuaciones del Coordinador y la interpretación del autor se mantienen separadas.

Qué está documentado

Fecha y fuente	Actuación observable	Límite de la lectura
23 junio 2026 S1	El promotor ingresa una solicitud por una vía excepcional de obra urgente.	Los 80 MW y el calendario comercial de 2030 son datos declarados; no son capacidad entregada ni MW IT comprobados.
12 agosto 2026 S2	El promotor solicita más tiempo para completar antecedentes técnicos.	La petición no prueba que se hayan contratado, pagado o terminado los trabajos mencionados.
13 agosto 2026 S3	El Coordinador concede ampliación y fija el 13 de octubre como fecha máxima.	Una ampliación del trámite no demuestra autorización final, reserva de suministro o aceptación del servicio.
13 octubre 2026 S4	El promotor desiste de esa solicitud y declara que examinará otra conexión.	Evaluar una alternativa no acredita que sea ejecutable o económicamente preferible.
19 octubre 2026 S5	El Coordinador comunica a la CNE la finalización del proceso.	El documento cierra el proceso identificado; no resuelve el conjunto de permisos ni la rentabilidad del campus.

La comparación que puede hacerse

S2 contiene una petición de plazo; S3 es la comunicación que establece el vencimiento concedido. Para el registro de decisión se conserva la fecha expresamente fijada en S3, sin sustituirla por una suma calculada desde la petición. S4 documenta el desistimiento en esa fecha. La secuencia permite reconstruir actos y referencias; no demuestra el efecto causal de la coordinación sobre el resultado.

S4 identifica una conexión alternativa cuya factibilidad técnica y económica se encuentra en evaluación. También conserva la posibilidad de promover una nueva solicitud. De esas dos posiciones no se deducen disponibilidad de capacidad, derechos suficientes para construir, acuerdos de uso ni fecha de entrega aceptada por un comprador.

Lectura de las Siete Puertas con evidencia parcial

Puerta	Qué permite registrar esta selección	Qué permanece abierto
Demanda	Se identifica el proyecto mencionado por el promotor.	Clientes, precio, contrato, solvencia, aceptación y facturación.
Terreno y permisos	Existe una actuación relativa a una obra eléctrica identificada.	Título, habilitaciones restantes, servidumbres y derechos de ejecución del campus.
Energía	Se observan solicitud, petición de plazo, prórroga y cierre de una vía.	Suministro firme, capacidad entregada, costo y alternativa finalmente aprobada.
Conectividad	Los cinco originales no permiten reconstruir las rutas de telecomunicaciones.	Accesos, operadores, independencia, capacidad, contratos y mediciones.
Diseño y operación	Se mencionan antecedentes e ingeniería en preparación.	Diseño completo, pruebas, recursos, procedimientos y operación.
Construcción y entrega	S2 declara trabajos necesarios para responder observaciones.	Contratos ejecutados, desembolsos, avance, recepción y calendario integral.
Retorno y salida	S4 enuncia una evaluación técnica y económica de alternativa.	Flujos, inversión, exposición no recuperable, costo de espera y resultado económico.

No demostrado significa aquí que esta selección no acredita la afirmación. No se reemplaza un dato ausente por cero MW reales, cero contratos o ausencia de toda alternativa. El registro distingue alcance del documento, estado de conocimiento y estado del activo.

Actores y facultades que sí se observan

El promotor formula peticiones y comunica su decisión sobre la solicitud. El Coordinador requiere antecedentes según las referencias cruzadas, concede la ampliación y comunica el cierre. Las competencias y efectos generales se estudian en el régimen aplicable; este ejemplo no utiliza el nombre del cargo o una carta aislada para atribuir control sobre contratos de terceros o autorización de todas las obras.

Para una diligencia empresarial adicional habría que pedir la configuración alternativa, las condiciones de su utilización, responsables, fechas y recursos necesarios. La pregunta útil sería qué decisión puede fundarse con lo disponible y qué obligación requeriría soporte nuevo. Este es un uso analítico del expediente; no se atribuye a Scala una decisión de inversión que no esté documentada.

Registro mínimo para seguir la reformulación

Campo	Dato que debe conservarse
Objeto y versión	Solicitud original y configuración alternativa, cada una con fuente y fecha.
Cambio relevante	Antecedente que afecta la evaluación; distinguir observación recibida de hecho material ocurrido.
Facultad y actor	Petición o actuación acreditada y límites de lo que puede inferirse.
Ventana	Plazo expresamente concedido, vencimiento comercial si se documenta y dependencias de terceros.
Resultado	Continuidad, reformulación o cierre de la vía; la aceptación del servicio exige evidencia adicional.
Economía	Estudios, pagos, compromisos, cancelaciones y recuperaciones solo cuando tienen fuente.

Conclusión de la aplicación

La selección muestra una vía de tramitación reformulada y cerrada. Permite diferenciar petición, prórroga, desistimiento, evaluación de alternativa y finalización del proceso. No permite atribuir un ahorro, una pérdida, una opción económicamente valiosa o capacidad comercial disponible. La utilidad del método consiste en conservar esas diferencias y convertirlas en preguntas documentales antes del siguiente compromiso.

Fuentes primarias del caso

S1. Scala Data Centers Chile SpA. 23 de junio de 2026. Comunicación OP01520-26. Documento público original, con referencias y objeto propios.

https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2026/06/OP01520-26.pdf

S2. Scala Data Centers Chile SpA. 12 de agosto de 2026. Comunicación OP01882-26. Documento público original, con referencias y objeto propios.

https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2026/10/OP01882-26-1.pdf

S3. Coordinador Eléctrico Nacional. 13 de agosto de 2026. Comunicación DE05401-26. Documento público original, con referencias y objeto propios.

https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2026/10/DE05401-26.pdf

S4. Scala Data Centers Chile SpA. 13 de octubre de 2026. Comunicación OP02334-26. Documento público original, con referencias y objeto propios.

https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2026/10/OP02334-26.pdf

S5. Coordinador Eléctrico Nacional. 19 de octubre de 2026. Comunicación DE06756-26. Documento público original, con referencias y objeto propios.

https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2026/10/DE06756-26.pdf

V Ejemplo resuelto desde la aceptación hasta el primer cobro

Esta continuación de Campus Horizonte es íntegramente hipotética. Introduce fichas y registros de aprendizaje posteriores al corte H-FID; no altera la conclusión de evidencia insuficiente de ese expediente ni convierte el caso en un proyecto real. Su objetivo es mostrar el cierre documental de un bloque y de una primera factura.

Se conserva el supuesto de 100 MW IT por bloque y la tarifa base de US$190 por kW-mes. La aceptación del primer bloque se sitúa al comienzo del año 2. El modelo base del campus presenta VAN negativo: cumplir una entrega no demuestra por sí solo rentabilidad ni autoriza la expansión.

Los supuestos del ejercicio

Elemento	Valor didáctico y alcance
Unidad	Bloque H-1 con 100 MW IT aceptados bajo un escenario y frontera definidos.
Cliente	Contrato de capacidad de 50 MW, sin atribuirlo a una empresa real.
Precio	US$190 por kW-mes, supuesto de aula del caso base.
Inicio	Primer día del año 2, condicionado a la aceptación prevista en el contrato ficticio.
Energía	Cargo separado conforme a medición y mecanismo pactado; no se cuantifica en esta factura.
Primer período	Un mes completo de capacidad, sin créditos, impuestos ni otros cargos en el ejercicio.
Pago	Se supone un abono bancario por el importe de capacidad, conciliado después de facturar.

Expediente de aprendizaje

Registro ficticio	Qué contiene	Qué decisión respalda
H1-C01 Contrato	Producto, 50 MW, tarifa, fecha, aceptación, créditos y pago.	Determinar las obligaciones y el hito de facturación.
H1-T01 Pruebas	Configuración, carga, contingencia, instrumentos, resultados y pendientes.	Revisión técnica del alcance probado.
H1-A01 Aceptación	Objeto, testigos, autoridad, resultado y límites.	Aceptar el bloque en las condiciones definidas.
H1-O01 Recepción operativa	Planos, inventarios, procedimientos, accesos, repuestos y formación.	Entregar a un equipo que puede operar el alcance recibido.
H1-F01 Factura	Período, capacidad, precio y referencia al hito contractual.	Emitir el cargo de capacidad correspondiente.
H1-P01 Conciliación	Importe, fecha y correspondencia entre factura y abono.	Registrar la caja cobrada y las diferencias, si existen.

Los identificadores anteriores nombran fichas de aula; no imitan resoluciones administrativas, certificados de terceros o contratos firmados. En una aplicación real se sustituirían por originales y se comprobarían derechos, delegaciones, alcance y condiciones de aceptación.

Conciliación de cantidades y dinero

Estado	Cantidad o importe	Razón
Capacidad IT aceptada	100 MW IT	El supuesto incluye prueba y aceptación de ese bloque.
Capacidad bajo contrato	50 MW IT	Solo esa parte tiene cliente en el ejercicio.
Capacidad con hito de facturación	50 MW IT	Se cumple el hito contractual para el primer período.
Ingreso de capacidad mensual	US$9.500.000	50.000 kW × US$190 por kW-mes.
Importe facturado de capacidad	US$9.500.000	Se supone una factura sin ajustes adicionales.
Caja antes del pago	US$0	La factura aún no acredita recepción de dinero.
Caja después del abono supuesto	US$9.500.000	La conciliación didáctica vincula abono y factura.

Los 50 MW aceptados sin cliente no se convierten en ingreso por tener pruebas favorables. Tampoco se suma la capacidad contratada a la aceptada: ambas cifras describen estados del mismo bloque. Los ingresos anuales serían US$114 millones solo si se mantienen doce meses completos bajo esas condiciones.

Tres desviaciones y la decisión que cambia

Desviación supuesta	Revisión necesaria	Respuesta que debe documentarse
Aceptación pendiente	Qué condición exige el contrato para iniciar el cargo.	Mantener la facturación pendiente si ese es el hito; no reemplazarlo por una prueba aislada.
Servicio degradado tras aceptar	Alcance del evento, capacidad, medición, contrato y créditos.	Examinar remedios y continuidad; no presumir que todo el ingreso desaparece.
Factura emitida sin pago	Plazo, disputa, notas de crédito y abono.	Mantener separado derecho de cobro, saldo y caja recibida.

Cierre del ejercicio

La decisión técnica se refiere a una configuración probada; la aceptación contractual utiliza sus propias condiciones; la recepción operativa comprueba medios y conocimiento del equipo; la factura responde al hito y al período; la caja requiere un pago. Cada actuación tiene actor, fecha y evidencia. El expediente se reabre si un cambio afecta el soporte de una decisión anterior.

W Soluciones comentadas de ejercicios clave

Dos operadores y un cruce común

Supuesto: dos servicios de 100 Gbit/s utilizan un mismo cruce y transportan en conjunto 140 Gbit/s. Se distinguen dos eventos. Si falla solo un enlace y el otro conserva 100 Gbit/s útiles, faltan 40 Gbit/s para la demanda completa. Si el evento retira el cruce compartido y ambos servicios dependen efectivamente de él, no se conserva esa alternativa de transporte en el escenario definido.

Respuesta defendible: identificar la causa, la capacidad sobreviviente y el servicio prioritario. Un inventario de dos contratos no resuelve el riesgo. El déficit de capacidad no se convierte directamente en porcentaje de paquetes perdidos; el comportamiento exige tráfico, colas y políticas de servicio. Si se desconoce el trazado, la independencia queda pendiente de comprobación.

Qué debe responder el lector	Evidencia o razonamiento suficiente
Qué falla	Escenario identificado y relación con los activos afectados.
Qué permanece	Capacidad útil del camino que sobrevive bajo ese escenario.
Qué carga se sostiene	Demanda crítica, prioridades y condiciones de operación degradada.
Qué falta verificar	Trazado, terceros, demarcación, prueba y limitaciones del acceso.
Qué decisión se adopta	Mitigar, limitar servicio o aceptar riesgo con autoridad, plazo y fundamento.

Plazo de recuperación y disponibilidad

Supuesto aritmético: un mes de treinta días continuos tiene 43.200 minutos. Un objetivo de disponibilidad de 99,99 % deja 4,32 minutos del período fuera del objetivo si se cuentan todos los minutos y no se aplican exclusiones. El cálculo es 43.200 × (1 0,9999). No representa indisponibilidad observada ni sustituye el método contractual.

Respuesta defendible: el RTO se refiere a una función y a su recuperación; el porcentaje de disponibilidad utiliza un período y una regla de cómputo. No se deduce uno del otro. La recepción del incidente, el inicio del reloj, la restauración funcional y la reparación física deben conservarse por separado.

Un archivo entregado que el sucesor no puede usar

Supuesto: se entrega una configuración completa, pero el destinatario no dispone de una licencia necesaria o el archivo corresponde a otra versión. Respuesta defendible: registrar el objeto recibido, su versión, el derecho o acceso pendiente, la tarea que no pudo ejecutarse y el actor que puede resolverlo. La cantidad de archivos no permite declarar transferencia funcional completada.

La prueba puede consistir en restaurar en un entorno acordado, localizar un circuito o ejecutar una tarea concreta. Se conserva su resultado y alcance. Una restauración en laboratorio no se presenta automáticamente como continuidad productiva comprobada.

Matriz de aceptación con un requisito abierto

Supuesto: la fibra cumple su presupuesto de pérdidas, pero no hay información suficiente sobre separación exterior de rutas. Respuesta defendible: aceptar, si corresponde, el alcance óptico probado y conservar abierta la conclusión de diversidad. La autoridad debe resolver cómo afecta esa brecha a la recepción del servicio completo según los criterios establecidos.

Son admisibles recomendaciones diferentes si conservan el objeto, reconocen la información ausente y justifican la facultad de quien decide. No es admisible completar el dato faltante con una suposición y presentarlo como prueba.

Cómo revisar una respuesta

Criterio	Qué debe quedar visible
Unidad	Producto, fase, frontera y fecha de corte.
Evidencia	Fuente, versión, alcance y limitaciones.
Actor	Quién puede verificar, aprobar o ejecutar y con qué límites.
Consecuencia	Qué decisión cambia y qué sigue pendiente.
Alternativas	Explicaciones o soluciones diferentes que aún son posibles.

X Reglas para actualizar evidencia y decidir

Las fichas deben poder utilizarse por personas diferentes sin reconstruir el significado de cada columna. Antes de registrar un resultado se acuerdan objeto, versión, fuente, estado de conocimiento y decisión que se pretende respaldar. Las escalas de este libro son ayudas de trabajo del autor; su reproducibilidad y utilidad pueden investigarse, pero no se presumen validadas.

Estados de conocimiento

Estado	Regla de uso
Demostrado para el alcance	Existe un antecedente revisado que corresponde a objeto, fase y decisión declarados.
Condicionado	Se identifica una condición concreta pendiente, con responsable, fecha y evidencia necesaria.
En investigación	Falta información para resolver la cuestión y se conserva esa ausencia.
No demostrado	La afirmación no dispone de soporte suficiente dentro del expediente examinado.
Superado por un cambio	El antecedente representaba otra configuración o momento y requiere nueva revisión para la decisión actual.

El último estado describe el uso del antecedente, no una quinta nota de las Siete Puertas. Puede acompañar cualquiera de sus estados. Un documento antiguo puede seguir siendo pertinente; uno reciente puede dejar de serlo por una modificación posterior.

Registro de un cambio

Campo	Pregunta de comprobación
Identificador	¿Qué servicio, bloque o registro se modifica?
Referencia anterior	¿Qué objeto y versión respaldaban la conclusión previa?
Disparador	¿Qué hecho o nueva información obliga a revisar y cómo se acredita?
Dependencia	¿Qué permiso, tercero, recurso o acceso queda afectado?
Autoridad	¿Quién puede decidir la revisión, el cambio y su aceptación?
Prueba	¿Qué comprobación corresponde y qué criterio se aplicará?
Resultado	¿Qué dato, limitación o desacuerdo debe conservarse?
Destinatario	¿Quién utilizará el registro y para qué tarea?
Cierre	¿Qué decisión se adoptó, cuándo y con qué condición de reapertura?

La deuda de resiliencia puede describirse mediante brechas concretas: dependencia compartida sin resolver, capacidad insuficiente ante el evento acordado, recuperación sin ensayo o evidencia que ya no corresponde a la configuración. El registro mantiene impacto, control temporal, responsable, autoridad, vencimiento y prueba de cierre. No convierte automáticamente esas brechas en una probabilidad de falla o en una deuda financiera.

Revisión por dos lectores

Para mejorar el instrumento, dos lectores pueden revisar un mismo subconjunto de documentos, conservar sus clasificaciones originales y comparar desacuerdos sobre objeto, estado y evidencia suficiente. Después se documentan las reglas aclaradas y la versión del diccionario. La concordancia describe consistencia de aplicación, no demuestra un efecto causal sobre rentabilidad o continuidad.

Y Uso de las herramientas editables y actualización

El archivo Herramientas_Hyperscale.xlsx acompaña esta edición. Reúne el modelo económico de Campus Horizonte y plantillas de evidencia, decisiones, aceptación, conectividad y transferencia. Las celdas de entrada se distinguen de las fórmulas; cada registro debe mantener su fuente y estado.

Modelo financiero

El modelo usa una sola construcción de flujos. Los supuestos de capacidad, tarifa, costos, impuestos, deuda, reposición y salida alimentan el resultado. La demora desplaza la aceptación y los cobros manteniendo el calendario original de obra, tal como en el escenario de demora del capítulo 7. Cambiar ese convenio requiere revisar el modelo, no solo el nombre del escenario.

Los valores predeterminados son los del caso didáctico. Para una aplicación real deben sustituirse por datos de contratos y presupuestos, incorporarse los conceptos excluidos y revisarse el alcance fiscal y financiero. Los resultados no representan precios ni rentabilidad de un emplazamiento específico.

Plantillas y control de versiones

Conserve una versión base y una copia por decisión o fecha de corte. No reutilice como hecho una fila de ejemplo. En cada modificación registre identificador, fuente, versión, responsable, cambio, resultado y consecuencia. Las rutas y contratos sensibles permanecen en un repositorio con acceso controlado; la ficha contiene una referencia utilizable por el destinatario.

La puntuación de conectividad requiere evaluar los nueve ejes. Un dato faltante permanece pendiente. Las condiciones críticas se definen para el servicio y la decisión: un total alto no cierra una brecha necesaria. La aceptación relaciona la prestación, sus prerrequisitos, la prueba, el verificador y la autoridad que puede resolverla.

Actualización del libro

Antes de utilizar una referencia técnica o regulatoria se comprueban emisor, edición, fecha, alcance, estado y aplicación local. Una publicación corporativa, una norma, un artículo científico y un expediente administrativo cumplen funciones diferentes. Los cambios se incorporan con una fecha de corte y una explicación de qué criterio o cálculo afectaron.

El índice impreso y los marcadores de esta edición utilizan las páginas del PDF revisado. El índice analítico siguiente conduce a los lugares principales de consulta; las nuevas aplicaciones se identifican con las letras U a Y.

Z Índice analítico

Tema	Páginas principales
Aceptación	202, 204, 207, 254, 264
Activo y fronteras	31, 32, 77, 232
Adquisición y opción	77, 79, 80, 81
Agua y refrigeración	113, 115, 120, 239
Autoridad de decisión	86, 208, 210, 221, 244
Bancabilidad	13, 234, 281
BESS	105, 110, 206
Caja y facturación	13, 68, 229, 233, 234
Capacidad sobreviviente	90, 182, 186, 188
CAPEX y OPEX	69, 70, 73, 240
Carriers y demarcación	163, 166, 170, 252
Caso documental NUP 7459	286
Causas comunes	182, 183, 187, 188
Cliente ancla	40, 45, 237
Commissioning	202, 203, 204, 264
Condiciones precedentes	76, 81, 244, 278
Conectividad territorial	144, 149, 151
Contratos	36, 39, 221, 238
Control de cambios	183, 219, 220
Créditos de servicio	191, 221, 243
Datos e incertidumbre	65, 147, 148, 234
Derechos de acceso	149, 150, 253
Desempeño	194, 196, 205, 219

Tema	Páginas principales
Deuda de resiliencia	182, 185, 219, 220
Deuda y cobertura	73, 75, 284
Diversidad física	138, 144, 182, 190
Documentación y transferencia	206, 219, 245, 253
Ejercicios resueltos	295
Energía y potencia	101, 108, 237
Escenarios financieros	70, 71, 73, 75
Evidencia de campo	147, 148
Expansión	34, 79, 148, 246
FAT y SAT	203, 204, 207
Fiber Readiness	144, 145, 273
Five Readiness	12, 272, 273
Glosario	260, 261, 262, 263
Herramientas editables	300
Incidentes y recuperación	215, 222, 227, 279
Inversión por etapas	63, 70, 80, 244
Latencia y percentiles	194, 196, 199, 219
Mantenimiento	192, 218, 226
MMR e interconexión	152, 154, 163
Modelo de negocio	36, 38, 238
MW anunciados y utilizables	32, 68, 232, 233
MW facturables	13, 231, 234, 281
Operación y personal	208, 214, 225, 226
Permisos y servidumbres	63, 149, 150, 239
Primer cobro y conciliación	291

Tema	Páginas principales
Pruebas integradas	202, 206, 207, 264
RACI y responsabilidades	210, 221, 258
Refrigeración y contingencia	113, 120, 124
Reglas de actualización	298
Retorno y valor de salida	75, 76, 241, 245
Riesgo residual	188, 220, 244
RTO y reparación	191, 222, 225, 262
Rutas y SRLG	138, 182, 187, 190
Seguridad y control	125, 128, 130, 210
Siete Puertas	11, 63, 64, 244
SLA y SLO	221, 222, 243
Tablero de dirección	210, 211, 224, 282
TIR y VAN	71, 75, 241, 284
TRACE-DC	256, 257
Transferencia operativa	206, 245, 265
Vigencia de la evidencia	14, 219, 220
Índice y lectura	8, 15, 20

Las localizaciones corresponden a la paginación de esta edición revisada. Los ejemplos hipotéticos conservan su identificación; los hechos del caso U remiten a sus fuentes primarias.

Referencias normativas y técnicas

Las referencias siguientes orientan el diseño y la investigación. No reproducen el contenido de normas de pago ni sustituyen la consulta de la edición vigente.

1. Telecommunications Industry Association, ANSI/TIA-942-C, Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers. Información oficial: https://tiaonline.org/standard/tia-942/ y https://tiaonline.org/resource/tia-942-c-data-center-infrastructure-standard/
2. BICSI, ANSI/BICSI 002-2024, The Standard for Data Center Design. https://www.bicsi.org/standards/ansi-bicsi-002-2024-the-standard-for-data-center-design/
3. ISO/IEC 22237-1:2021, Information technology — Data centre facilities and infrastructures — Part 1: General concepts. https://www.iso.org/standard/78550.html
4. ISO/IEC 22237 series, Data centre facilities and infrastructures. Consultar el catálogo ISO/IEC para partes y ediciones vigentes: https://www.iso.org/
5. Uptime Institute, Tier Classification System and Tier Certification. https://uptimeinstitute.com/tiers y https://uptimeinstitute.com/tier-certification/
6. IETF, RFC 4271, A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4). https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4271
7. International Telecommunication Union and International Cable Protection Committee, International Advisory Body on Submarine Cable Resilience, 2026. https://www.itu.int/en/mediacentre/Pages/PR-2026-07-10-Submarine-cable-resilience-report.aspx
8. IEEE, IEEE 802.3 Ethernet Working Group. https://www.ieee802.org/3/

9. ITU-T, Recommendation G.652, Characteristics of a single-mode optical fibre and cable. Consultar edición vigente en el catálogo de recomendaciones: https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652/
10. ITU-T, Recommendation G.657, Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable. Consultar edición vigente en el catálogo de recomendaciones: https://www.itu.int/rec/T-REC-G.657/
11. IETF RFC 7454, BGP Operations and Security, prácticas operacionales para el intercambio BGP. https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7454.html
12. IETF RFC 8212, Default External BGP Route Propagation Behavior without Policies. https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8212.html
13. IETF RFC 6811, BGP Prefix Origin Validation, y RFC 8481, clarificaciones de validación de origen basadas en RPKI. https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6811.html y https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8481.html
14. IETF RFC 9234, Route Leak Prevention and Detection Using Roles in UPDATE and OPEN Messages. https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9234.html
15. ISO/IEC 22237, *Information technology — Data centre facilities and infrastructures*, serie y ediciones publicadas: Parte 1 (2021), Parte 2 (2024), Parte 3 (2021), Parte 4 (2021), Parte 5 (2018), Parte 6 (2024), Parte 7 (TS 2018). Verificar estado y catálogo vigente: https://www.iso.org/committee/654019/x/catalogue/
16. CEN-CENELEC, serie EN 50600 sobre instalaciones e infraestructuras de centros de datos; CLC/TS 50600-5-1 sobre madurez de sostenibilidad ambiental. Consultar la edición nacional vigente: https://www.cencenelec.eu/ y https://www.cencenelec.eu/news-events/news/2022/eninthespotlight/2022-05-30-a-new-standard-for-the-green-deal/

17. IEC 62040-1:2017+AMD1:2021+AMD2:2022, *Uninterruptible power systems — Part 1: Safety requirements*. https://webstore.iec.ch/en/publication/80573

18. ASHRAE, TC 9.9 Datacom Encyclopedia and Datacom Series, including thermal guidelines and liquid-cooling guidance for data-processing environments. https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/datacom-series y https://datacom.ashrae.org/

19. NFPA 75:2024, *Standard for the Fire Protection of Information Technology Equipment*. https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-standard-development-process/75

20. ISO/IEC 30134-2:2026, *Information technology — Data centres key performance indicators — Part 2: Power usage effectiveness (PUE)*. https://www.iso.org/standard/30134-2

21. ISO/IEC TS 22237-31:2026, *Information technology — Data centre facilities and infrastructures — Part 31: Key performance indicators for resilience*. https://www.iso.org/standard/88711.html

22. BICSI, ANSI/BICSI 009-2024, *The Standard for Data Center Operations*. https://www.bicsi.org/standards/ansi-bicsi-009-2024-the-standard-for-data-center-operations/

23. International Energy Agency (IEA), *Energy and AI*, 2025. Scenario analysis of data-centre electricity consumption, supply and grid constraints. https://www.iea.org/reports/energy-and-ai

24. International Energy Agency (IEA), *Electricity 2026*, 2026. Five-year outlook for electricity demand, supply, grids, flexibility, emissions, prices and reliability. https://www.iea.org/reports/electricity-2026

25. Uptime Institute, *Global Data Center Survey Results 2026*. Survey of owner/operator experience, investment, resiliency, sustainability, efficiency, staffing, cloud and AI. https://uptimeinstitute.com/resources/research-and-reports/uptime-institute-global-data-center-survey-results-2026

26. Environmental Defense Fund and Nuveen, *Decoding Data Centers: Sustainability Due Diligence Across the Value Chain*, 2026. Investor questions on energy, water and community impacts across the AI ecosystem. https://business.edf.org/insights/decoding-data-centers-sustainability-due-diligence-across-the-value-chain/

27. Baker McKenzie, *Data Centers Unlocked: What's New and What Matters*, 2025. Global guide to legal, commercial, land, power, connectivity, sustainability and delivery considerations. https://www.bakermckenzie.com/-/media/files/insight/publications/2025/12/baker-mckenzie-data-centers-unlocked.pdf

28. Haskoning, *Technical Due Diligence for Data Centres*. Acquisition, greenfield, lender and portfolio technical review scope. https://www.haskoning.com/en/services/technical-due-diligence-for-data-centres

29. U.S. Department of Energy, Federal Energy Management Program, *Best Practices Guide for Energy-Efficient Data Center Design*, 2024. Guidance on cooling, water, electrical systems, air management, heat reuse and efficiency. https://www.energy.gov/cmei/femp/articles/best-practices-guide-energy-efficient-data-center-design

30. International Energy Agency, *Key Questions on Energy and AI*, 2026. Updated data and analysis on data-center electricity demand, AI, grids, supply and flexibility. https://www.iea.org/reports/key-questions-on-energy-and-ai

31. ASHRAE, Pacific Northwest National Laboratory and National Electrical Manufacturers Association, *AI Data Center Energy Performance Framework*, released June 10, 2026. Guidance on integrated design, energy and thermal performance, resilience, operations, commissioning and performance validation. https://www.ashrae.org/technical-resources/ai-data-center-framework

32. Open Compute Project, Data Center Facility Project and related workstreams on power distribution, energy storage, liquid cooling and open AI cluster design, consulted October 2026. The work describes active reference and standardization efforts; it does not make emerging architectures universal requirements. https://www.opencompute.org/projects/data-center-facility/ ; https://www.opencompute.org/projects/data-center-facility/power-distribution/ ; https://www.opencompute.org/projects/data-center-facility/energy/energy-storage-systems/ ; https://www.opencompute.org/projects/strategic-initiatives/cluster-designs-for-ai/

33. International Telecommunication Union and International Cable Protection Committee, *International Advisory Body on Submarine Cable Resilience: Report of the Working Groups*, 2026. https://www.itu.int/hub/publication/s-iab-wg-2026/

34. Gobierno de Chile, *Cable Humboldt: Aprueban instalación del cable submarino de Google que unirá Chile con Asia-Pacífico*, 22 June 2026. Status, route and schedule should be rechecked before publication or procurement. https://www.gob.cl/noticias/cable-humboldt-aprueban-instalacion-del-cable-submarino-de-google-que-unira-chile-con-asia-pacifico/

35. Google, *Presentamos los cables submarinos Alisios, Canoa y OlaLuz*, 11 August 2026. Corporate announcement of proposed systems and route plans; not evidence that capacity is in service. https://blog.google/intl/es-419/actualizaciones-de-producto/en-la-nube/presentamos-los-cables-submarinos-alisios-canoa-y-olaluz/

36. Equinix, Form 10-K for year ended December 31, 2025, company description of IBX, colocation and interconnection services. Corporate disclosure; product and availability claims must be verified for each site. https://investor.equinix.com/sec-filings/all-sec-filings/content/0001101239-26-000032/eqix-20251231.htm

37. Equinix Product Documentation, Cross Connect, consulted October 2026. Product documentation is useful to understand demarcation and ordering; it does not validate route diversity. https://docs.equinix.com/es/cross-connect/

38. Digital Realty, 2025 results and corporate materials on PlatformDIGITAL, colocation and interconnection, consulted October 2026. Company descriptions are not independent performance verification. https://investor.digitalrealty.com/news-releases/news-release-details/digital-realty-reports-fourth-quarter-2025-results

39. ON*NET Fibra Chile, company description of its wholesale, open-access fiber model; Entel corporate announcement of network sale and wholesale use; consulted October 2026. https://www.onnetfibra.com/nuestra-empresa/quienes-somos ; https://informacioncorporativa.entel.cl/comunicados-de-prensa/entel-acuerda-venta-de-su-red-de-fibra-optica-en-chile-a-on-net-fibra-y-sella-acuerdo-de-largo-plazo-para-usar-red-de-la-operadora-mayorista

40. The Network Installers, “Construcción del centro de datos,” industry explainer supplied by the author. https://thenetworkinstallers.com/es/blog/construcci%C3%B3n-del-centro-de-datos/

41. STL Tech, “Guide to Data Center Design,” industry explainer supplied by the author. https://stl.tech/blog/guide-to-data-center-design/

42. Cirion Technologies, “Guía de centro de datos,” industry explainer supplied by the author. https://www.ciriontechnologies.com/es/data-center/recursos/data center-guia/

43. Valdebenito Calderón, Abraham. *El Mundo No Está en la Nube*, versión de trabajo V3, manuscrito complementario del autor, 2026. Material de trabajo reorganizado y sintetizado para esta obra; no se presenta como norma externa ni como referencia de mercado.

44. ITU-T Focus Group on Costing Models for International Internet Connectivity, *Terminology and Taxonomy for International Internet Connectivity*, informe técnico, octubre de 2025. Incluye una taxonomía de componentes físicos y aspectos habilitadores de conectividad; se usa como marco terminológico, no como norma universal de infraestructura digital. https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/fg/T-FG-CD-2025-6-PDF-E.pdf

45. World Bank, *Advancing Cloud and Data Infrastructure Markets: Executive Summary*, 2024. Energía, conectividad de banda ancha, capacidades, regulación y mercado de nube y centros de datos. https://www.worldbank.org/en/brief/2024/05/22/advancing-cloud-and-data-infrastructure-markets-executive-summary

46. World Bank and International Telecommunication Union, *Green Data Centers: Towards a Sustainable Digital Transformation*. Guía de política, desarrollo, operación y compra de infraestructura de centros de datos sostenible y resiliente al clima. https://www.worldbank.org/en/topic/digital/publication/green-data-centers-towards-a-sustainable-digital-transformation

47. National Institute of Standards and Technology, *The NIST Cybersecurity Framework (CSF) 2.0*, 2024. Funciones Govern, Identify, Protect, Detect, Respond y Recover. https://www.nist.gov/cyberframework

48. National Institute of Standards and Technology, *SP 800-82 Rev. 3, Guide to Operational Technology Security*, septiembre de 2023. Consultar revisión y estado vigente antes de publicar. https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/82/r3/final

49. Chile, Ley 21.663, Ley Marco de Ciberseguridad, Biblioteca del Congreso Nacional. Aplicabilidad según texto vigente, clasificación y entidad. https://www.bcn.cl/leychile/Navegar?idNorma=1202434

50. Parlamento Europeo y Consejo, Directiva (UE) 2022/2557, relativa a la resiliencia de las entidades críticas (CER). Verificar transposición y alcance nacional aplicable. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX:32022L2557

51. UNITAR and International Telecommunication Union, *The Global E-waste Monitor 2024*. https://unitar.org/about/news-stories/press/global-e-waste-monitor-2024-electronic-waste-rising-five-times-faster-documented-e-waste-recycling

52. Google Cloud Service Health, *Google Cloud networking issues in the Middle East*, 7 de junio de 2022. Informe de incidente sobre dos cortes de fibra simultáneos y sus efectos en servicios. https://status.cloud.google.com/incidents/YrjzRWPFBUZU5HJZ4mN7

53. Google Cloud Service Health, *Google Cloud networking issues in australia-southeast2*, 29 de octubre de 2024. Informe de incidente sobre interrupción eléctrica, infraestructura de red/óptica y fallas de fibra concurrentes. https://status.cloud.google.com/incidents/Pvq1RGrACDwogEE8hcrm

54. Amazon Web Services, *Summary of the AWS Service Event in the US East Region*, 2011. Informe público sobre energía, EC2, EBS y dependencias del plano de control. https://aws.amazon.com/message/67457/

55. Meta Engineering, *More details about the October 4 outage*, 5 de octubre de 2021. Análisis público de cambios de backbone, anuncios BGP, DNS y recuperación. https://engineering.fb.com/2021/10/05/networking-traffic/outage-details/

56. International Telecommunication Union, United Nations Office for Disaster Risk Reduction and Sciences Po, *When digital systems fail: an expert report*, 2026. https://www.itu.int/hub/publication/s-rep-wtisd-2026/

57. International Telecommunication Union, *Measuring digital development: Global Connectivity Report 2025*. Contexto sobre conectividad global, cables submarinos, resiliencia y políticas de infraestructura. https://www.itu.int/hub/publication/D-IND-ICT_MDD.GCR-2025-4/

58. CBRE Research, *2025 Global Data Center Investor Intentions Survey*, publicado el 6 de agosto de 2025. Encuesta a 92 inversionistas globales; las respuestas describen opiniones de la muestra en ese periodo. https://www.cbre.com/insights/reports/2025-global-data-center-investor-intentions-survey

59. Hwaiyu Geng, ed., *Data Center Handbook: Plan, Design, Build, and Operations of a Smart Data Center*, 2.ª ed., Wiley, 2021. Cobertura de planificación, finanzas, ROI/TCO, diseño, construcción y operación. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119597537

60. Amazon Web Services, *Data Center Operations Manager*, Amazon.jobs, descripción pública del puesto, consultada el 12 de octubre de 2026. Ejemplo de funciones de gestión de equipos, turnos, métricas, incidentes, procedimientos, experiencia del cliente y operación continua; el alcance es propio del empleador y del puesto publicado. https://www.amazon.jobs/en/jobs/10499227/data-center-operations-manager

61. U.S. Department of Energy, United States Data Center Energy Usage Report, diciembre de 2024. Estimaciones nacionales de consumo eléctrico y escenarios de demanda; las proyecciones tienen fecha y alcance definidos. https://www.energy.gov/articles/doe-releases-new-report-evaluating-increase-electricity-demand-data-centers

62. European Commission, Energy performance of data centres. Marco de seguimiento y reporte bajo la Energy Efficiency Directive y el Reglamento Delegado (UE) 2024/1364; consultar las obligaciones y la transposición aplicables a cada instalación. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive/energy-performance-data-centres_en

63. Infocomm Media Development Authority, Charting Green Growth for Data Centres in Singapore, 30 de mayo de 2024; Green Data Centre Roadmap y Tropical Data Centre Standard. Las metas de capacidad son objetivos de política y no capacidad ya entregada. https://www.imda.gov.sg/resources/press-releases-factsheets-and-speeches/factsheets/2024/charting-green-growth-for-data-centres-in-sg ; https://www.imda.gov.sg/how-we-can-help/green-dc-roadmap/tropical-dc-standard

64. Japan Ministry of Economy, Trade and Industry, Report 1.0 of the Public-Private Advisory Council on Watt-Bit Collaboration, 12 de junio de 2025. Coordinación de infraestructura eléctrica y de telecomunicaciones para el desarrollo de centros de datos. https://www.meti.go.jp/english/press/2025/0612_001.html

65. Empresa de Pesquisa Energética (Brasil), Consumo de Energia Elétrica: Consumo de Data Centers, portal y recopilación de información para planificación eléctrica, consultado en octubre de 2026. https://epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/consumo-de-energia-el%C3%A9trica/consumo-de-data-centers

66. Government of South Africa, Deputy Minister Kenny Morolong: AFSIC – South Africa Investment Summit, 15 de octubre de 2025. Perspectiva oficial sobre centros de datos y conectividad submarina en el desarrollo de un hub digital regional. https://www.gov.za/news/speeches/deputy-minister-kenny-morolong-afsic-sa-investment-summit-15-oct-2025

67. Western Cape Government, Provincial Economic Review and Outlook 2025: Changing with Growth, contexto regional sobre disponibilidad y seguridad del suministro eléctrico. https://www.westerncape.gov.za/treasury/article/pero-2025-changing-growth

68. Gleeds, Global Data Centre Market Report 2025, Commercial intelligence, enero de 2025. Benchmark de costo por MW para Santiago: rango bajo US$8,6 millones y alto US$10,9 millones. https://www.gleeds.com/media/umybrjx1/global-data-centres-report-2025_long-version.pdf

69. Senado de Chile, Data Centers en Chile: Competencia global impulsada por la IA, presentación de abril de 2026; datos atribuidos a GPS Property, Reporte Global de Mercado, segundo semestre de 2025. Estima US$10–12 millones por MW, solo CAPEX de infraestructura. https://microservicio-documentos.senado.cl/v1/archivos/82d28d0c-8e19-4f9a-a019-a3d50bb11696?includeContent=true

70. Colliers Chile, Auge de Data Centers en Chile: se instalarán 34 nuevos centros, 29 de septiembre de 2026. Capacidad instalada, proyectos en construcción y pipeline a 2031. https://www.colliers.com/es-cl/articulos/santiago/reporte-data-centers

71. PwC Chile, Perspectivas Globales de Data Centers 2026–2050, 22 de septiembre de 2026. Proyecciones elaboradas con Oxford Economics; estimación sobre la participación del equipamiento TIC en la inversión total chilena. https://www.pwc.com/cl/es/Publicaciones/perspectivas-globales-de-data-centers-2026-2050.html

72. National Institute of Standards and Technology (NIST), SP 800-82 Rev. 4, Guide to Operational Technology (OT) Security, Initial Public Draft, 21 de septiembre de 2026. Borrador abierto a comentarios hasta el 30 de noviembre de 2026. https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/82/r4/ipd

73. Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), Normas Técnicas Eléctricas y Pliegos Técnicos Normativos RIC, catálogo oficial y versiones aplicables según alcance del proyecto. https://www.sec.cl/normas-tecnicas-electricas/

74. National Fire Protection Association (NFPA), NFPA 70E, Standard for Electrical Safety in the Workplace, requisitos y guía para reducir riesgos de choque eléctrico, electrocución, arco y explosión de arco; consultar la edición aplicable. https://www.nfpa.org/education-and-research/electrical/learn-more-about-nfpa-70e

Nota final

La infraestructura se vuelve confiable cuando la promesa, el diseño, la obra, la prueba y la operación describen el mismo servicio. El centro de datos puede cambiar de operador, aumentar su capacidad, incorporar nuevas cargas de IA y conectarse a otros territorios. La evidencia permite que esa evolución ocurra sin perder el control de las rutas que sostienen el negocio.

Sobre el autor

El **Dr. Abraham Valdebenito Calderón** es especialista en telecomunicaciones, fibra óptica e infraestructura digital, con más de dos décadas de experiencia en el diseño, planificación, construcción y operación de redes. Su trayectoria combina liderazgo ejecutivo, consultoría y participación en proyectos internacionales para operadores, fabricantes, organismos técnicos e inversionistas.

Su experiencia internacional comprende iniciativas desarrolladas en **Sudamérica, Sudáfrica, Corea del Sur, China, Japón, Europa y Norteamérica**, así como proyectos vinculados con **Estonia y Rumania**. Ha participado en trabajos relacionados con redes **FTTx**, planta externa, transporte óptico, conectividad para centros de datos e infraestructura crítica, aportando en evaluación, ingeniería, planificación, despliegue, aseguramiento de calidad y gestión de proyectos.

Su formación combina estudios de ingeniería y telecomunicaciones con preparación de posgrado en gestión, estrategia y dirección empresarial. Ha cursado programas ejecutivos en **MIT Sloan School of Management**, y en **Kellogg School of Management de Northwestern University**, en áreas de gestión ejecutiva.

También cuenta con formación en comunicaciones avanzadas y tecnologías ópticas en la **University of Kent**, además de estudios y entrenamientos internacionales en fibra óptica, **FTTH/FTTx** y sistemas de comunicaciones ópticas con instituciones como **University of Southampton**, **Johns Hopkins University**, **NTT**, **KT** y la **Universidad de Tokio**. Su preparación se complementa con estudios en administración, marketing, recursos humanos, metodología de investigación y desarrollo directivo en instituciones de Chile y España.

Es autor de *La fibra no falló*, obra que conecta la ingeniería con la gestión y la operación de redes. En ella analiza cómo las decisiones de diseño, construcción y mantenimiento inciden en la confiabilidad de la infraestructura y en la calidad de los servicios que reciben las personas y las organizaciones.

Su aporte es convertir la conectividad y las dependencias del activo en decisiones verificables para inversión, ingeniería y operación.