



CURSO/GUÍA PRÁCTICA GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES



Índice

¿QUÉ APRENDERÁ?	20
Introducción.	21
PARTE PRIMERA.	22
Fundamentos para la circularidad modular habilitada por gemelos digitales	22
Capítulo 1: Conceptos clave y alcance profesional de la guía	22
1. Propósito y marco de trabajo	22
a. Objetivos de circularidad aplicados a unidades modulares.	22
b. Rol del gemelo digital en ciclos repetidos de proyecto.	23
c. Beneficios esperados: valor recuperado, residuos evitados y trazabilidad.	23
2. Definiciones esenciales	23
a. Gemelo digital (tipologías: de producto, de proceso, de sistema).	23
b. Economía circular (restaurar, regenerar, mantener valor).	24
c. Unidad modular (características de diseño para circularidad).	24
3. Ciclos de proyecto repetidos	24
a. Diseño–fabricación–operación–desmontaje–reutilización.	24
b. Bucles de reconfiguración y reubicación.	25
c. Sincronización físico–digital en cada fase.	25
4. Principios de diseño para circularidad	25
a. Diseñar para desmontaje (DfD) y reensamblaje.	25
b. Normalización de interfaces y modularidad funcional.	26
c. Materialidad y pasaportes digitales de componentes.	26
5. Casos de uso transversales	26
a. Construcción y edificación modular.	26
b. Energía, industria y eventos temporales.	27
c. Infraestructuras educativas y sanitarias móviles.	27
6. Mapa de actores y responsabilidades	27
a. Propietario de activos, operador y fabricante.	27
b. Integradores digitales, ingeniería y proveedores.	28
c. Stakeholders financieros, aseguradoras y auditores ESG.	28
Capítulo 2: Ciclo de vida digital del módulo: del diseño al reuso	29
1. Gemelo digital a lo largo del ciclo de vida	29
a. Requisitos, diseño y verificación virtual.	29
b. Fabricación conectada y pruebas digitales.	30
c. Operación, mantenimiento y fin de primer ciclo.	31
2. Captura de datos y eventos	31
a. IoT/sensórica, BIM/PLM y registros operativos.	31
b. Calidad de datos, veracidad y latencia.	32
c. Identidad digital del módulo (ID único).	33
3. Decisiones habilitadas por datos	33
a. Aptitud para reutilización y vida remanente.	33

b. Simulación de configuraciones alternativas.....	34
c. Priorización de reubicaciones según demanda.....	34
4. Gemelo de cartera (fleet-level twin)	35
a. Visión multi-sitio y multi-proyecto.....	35
b. Políticas de inventario modular y rotación.....	35
c. Optimización global vs. local.....	36
5. Integración con gestión de activos.....	37
a. CMMS/EAM y órdenes de trabajo conectadas.....	37
b. Trazabilidad de intervenciones y garantías.....	37
c. Historias clínicas del módulo (as-maintained).....	37
6. Entregables del ciclo de vida.....	38
a. Modelos y datasets mínimos por fase.....	38
b. Hitos de aceptación digital/física.....	39
c. Criterios de cierre y preparación de siguiente ciclo.....	39
PARTE SEGUNDA.....	41
Datos, estándares e interoperabilidad para la circularidad modular	41
Capítulo 3: Arquitectura de datos, ontologías y pasaporte digital de producto (DPP)	41
1. Modelo de información del módulo.....	41
a. Atributos estructurales, MEP y de uso.....	41
b. Especificaciones de materiales y desmontabilidad.....	42
c. Estados y transiciones del ciclo de vida.....	42
2. Ontologías y catálogos	43
a. Vocabularios comunes y taxonomías modulares.....	43
b. Clasificación de componentes e interfaces.....	43
c. Repositorios, versionado y linaje de datos.....	44
3. Pasaporte digital de producto (DPP)	44
a. Contenido mínimo: composición, rendimiento, mantenibilidad.....	44
b. Vinculación a series y unidades individuales.....	45
c. Lectura/escritura a lo largo de los ciclos.....	45
4. Calidad y gobernanza del dato.....	45
a. Reglas de validación y umbrales de completitud.....	45
b. Roles (data owner, steward, custodian).....	46
c. Auditorías y trazabilidad (data lineage).....	46
5. APIs e intercambio	47
a. Integración BIM–PLM–ERP–EAM–IoT.....	47
b. Sincronización maestro–proceso/esclavo y eventos.....	47
c. Gemelos federados y acuerdos de intercambio.....	47
6. Seguridad y soberanía	48
a. Segmentación OT/IT y control de acceso.....	48
b. Cifrado, identidad y firmas digitales.....	48
c. Retención, anonimización y portabilidad.....	48
Capítulo 4: Estándares y marcos de referencia para gemelos digitales y circularidad	50
1. Gestión de la información en entornos de activos	50
a. Principios de gestión colaborativa de la información.....	50

b. Requisitos de intercambio y entregables.	51
c. Contratos de información (EIR/AIR).	51
2. Modelos e intercambio BIM/IFC	52
a. Estructura IFC aplicable a módulos.	52
b. IDS/Model View Definitions para circularidad.	52
c. Reglas de validación y chequeo automático.	53
3. Gestión de activos y facility management	53
a. Procesos, roles y niveles de servicio.	53
b. Matrices RACI y KPIs de O&M.	54
c. Integración con gemelo en operación.	55
4. ACV y huella ambiental	55
a. Principios de ACV y límites del sistema.	55
b. Inventarios y factores de emisión.	56
c. Declaraciones ambientales de producto (EPD).	56
5. Economía circular (normas y guías).....	57
a. Principios, estrategia y métricas de circularidad.	57
b. Diseño para desmontaje y reutilización.	57
c. Indicadores materiales y de durabilidad.....	58
6. Conformidad y mejores prácticas	58
a. Auditorías técnicas y de datos.	58
b. Ensayos y certificación de módulos.....	59
c. Lecciones aprendidas y benchmarking.	59
PARTE TERCERA.	60
Estrategias núcleo: reutilizar, reconfigurar y reubicar	60
Capítulo 5: Reutilización basada en gemelos digitales	60
1. Diagnóstico de aptitud para reuso	60
a. Evaluación estructural y funcional.....	60
b. Vida remanente y fatiga.	61
c. Riesgos técnicos y de seguridad.	62
2. Reacondicionamiento y reparación.....	62
a. Sustitución de componentes críticos.	62
b. Actualizaciones de firmware/software.	63
c. Trazabilidad de refacciones y garantías.	63
3. Validación virtual y física.....	63
a. Simulación de rendimiento post-reacondicionado.	63
b. Pruebas in situ y criterios de aceptación.....	64
c. Sellos de conformidad para nuevo ciclo.	64
4. Logística del reuso	65
a. Planificación de desmontaje y embalaje.	65
b. Transporte y almacenamiento intermedio.	65
c. Reintegración con documentación digital.	66
5. Priorización de candidatos	66
a. Scoring multicriterio (coste, impacto, urgencia).	66
b. Disponibilidad vs. demanda de proyectos.....	66
c. Riesgos de obsolescencia.....	67

6. KPIs de reutilización	67
a. Residuos evitados y materiales recuperados.	67
b. Coste evitado y valor recuperado.	68
c. Emisiones evitadas (alcances relevantes).	68

Capítulo 6: Reconfiguración modular guiada por gemelos 69

1. Ingeniería de variantes..... 69

a. Configuradores y reglas paramétricas.	69
b. Interoperabilidad de interfaces y acoples.	70
c. Límites de diseño y compatibilidad.	70

2. Simulación y verificación 71

a. Comportamiento estructural/energético/MEP.	71
b. Ergonomía y seguridad de uso.	71
c. Comprobación de normativas aplicables.	72

3. Planificación de reconfiguración 72

a. Secuencias, recursos y ventanas de parada.	72
b. Gestión de repuestos y kits.	73
c. Coordinación con obra civil y servicios.	73

4. Documentación y gemelo 74

a. Actualización del DPP y “as-configured”.	74
b. Revisión de manuales y planes de O&M.	74
c. Etiquetado e identificación revisados.	74

5. Costes y control económico..... 75

a. Presupuestos comparativos (nuevo vs. reconfigurado).	75
b. Curvas de aprendizaje y productividad.	75
c. Riesgos de sobre coste y mitigación.	76

6. Aseguramiento de calidad 76

a. Pruebas FAT/SAT y checklists.	76
b. Criterios de aceptación en obra.	76
c. Registro de no conformidades y cierres.	77

Capítulo 7: Reubicación óptima de unidades modulares 78

1. Gemelo de red y demanda 78

a. Modelos de demanda por proyecto/ubicación.	78
b. Restricciones operativas y de acceso.	79
c. Calendarios, plazos y SLAs.	79

2. Optimización y decisión 80

a. Modelos de asignación y ruteo.	80
b. Balanceo entre costes y servicio.	80
c. Sensibilidades y escenarios.	81

3. Preparación para traslado 81

a. Checklists de desconexión/seguridad.	81
b. Protección, transporte y trazabilidad.	82
c. Verificación de compatibilidades en destino.	82

4. Puesta en marcha en destino 83

a. Commissioning y pruebas funcionales.	83
--	----

b. Integración con sistemas locales.	83
c. Transferencia de conocimiento al equipo.	83
5. Riesgos y contingencias.	84
a. Daños en tránsito y seguros.	84
b. Ausencias de infraestructura y plan B.	84
c. Planes de continuidad de negocio.	85
6. Métricas de desempeño.	85
a. Tiempos de ciclo y disponibilidad.	85
b. Coste total por reubicación.	86
c. Nivel de servicio y satisfacción del cliente.	86
PARTE CUARTA.	87
Operación, mantenimiento y logística inversa.	87
Capítulo 8: O&M predictivo para extender la vida útil.	87
1. Estrategia de mantenimiento.	87
a. Preventivo vs. predictivo vs. condicional.	87
b. Políticas por criticidad del módulo.	88
c. Matrices de priorización.	89
2. Analítica y gemelo.	90
a. Modelos de degradación y umbrales.	90
b. Detección de anomalías y alertas.	90
c. Gemelo como “libro de registro vivo”.	91
3. Gestión de repuestos.	92
a. Dimensionamiento y punto de reorden.	92
b. Reparables vs. consumibles.	92
c. Circularidad en repuestos (remanufactura).	93
4. Costes de O&M.	93
a. Estructura de costes y centros de coste.	93
b. Curvas de fallos y presupuestación.	94
c. Coste de indisponibilidad.	94
5. Seguridad y conformidad.	95
a. Protocolos de intervención seguros.	95
b. Bloqueo/etiquetado y permisos de trabajo.	95
c. Evidencias para auditorías.	96
6. Mejora continua.	96
a. RCA y lecciones aprendidas.	96
b. Actualización de planes y checklists.	96
c. Retroalimentación a diseño.	97
Capítulo 9: Desmontaje, reacondicionamiento y logística inversa.	98
1. Plan de desmontaje.	98
a. Secuencias y recursos críticos.	98
b. Riesgos y mitigaciones.	99
c. Coordinación con operaciones.	100
2. Trazabilidad física–digital.	100
a. Escaneado, etiquetado y serialización.	100



b. Registro de estado y daños.	101
c. Sincronización con gemelo y DPP.	101
3. Almacenaje intermedio	102
a. Condiciones ambientales y seguridad.	102
b. Inventario y rotación.	102
c. Preparación para siguiente uso.	103
4. Reacondicionamiento	103
a. Limpieza, inspección y pruebas.	103
b. Sustituciones y actualizaciones.	104
c. Certificados de conformidad.	104
5. Transporte y sostenibilidad	104
a. Elección de rutas y medios.	104
b. Emisiones asociadas y compensaciones.....	105
c. Embalajes reutilizables.	105
6. Fin de vida responsable.....	106
a. Canales de segunda vida.	106
b. Recuperación de materiales/reciclaje.	106
c. Evidencias de disposición final.....	106
PARTE QUINTA.	107
Medición, negocio y cumplimiento.....	107
Capítulo 10: KPIs, ACV y cuentas de resultado de la circularidad modular.....	107
1. KPIs técnicos y operativos	107
a. Disponibilidad, MTBF, MTTR.	107
b. Ratio de reutilización y ciclos completados.....	108
c. Tiempos de reconfiguración y reubicación.....	108
2. KPIs económicos	109
a. Coste evitado vs. compra nueva.....	109
b. Valor recuperado y TCO.	109
c. Productividad y utilización.....	110
3. KPIs ambientales.....	110
a. Residuos evitados (kg/ud y %).	110
b. Huella de carbono en ciclos.....	111
c. Consumo energético asociado.....	111
4. ACV aplicado a módulos.....	112
a. Límites del sistema y datasets.	112
b. Hotspots y medidas de reducción.	112
c. Integración de ACV en gemelo.	112
5. Cuadros de mando	113
a. Visualizaciones para distintos roles.	113
b. Alertas e insights accionables.....	114
c. Automatización de informes.	114
6. Auditoría y verificación	115
a. Evidencias y registros.	115
b. Muestreo y validación independiente.....	115
c. Mejora continua sobre indicadores.....	115

Capítulo 11: Contratación, modelos de negocio y financiación	117
1. Contratación para circularidad digital	117
a. Requisitos de información y entregables.	117
b. KPIs y penalizaciones/bonificaciones.	118
c. Propiedad de datos y acceso al gemelo.	119
2. Modelos de negocio	120
a. Product-as-a-Service y sus variantes.	120
b. Leasing circular y recompra.	121
c. Pools compartidos y mercados secundarios.	121
3. Riesgos y garantías.....	122
a. Garantías ligadas al estado del módulo.	122
b. Seguros y transferencia de riesgo.	122
c. Cláusulas de continuidad de servicio.	123
4. Estructuras de financiación.....	123
a. Financiación de activos modulares.	123
b. Líneas verdes y criterios de elegibilidad.	124
c. Reporting de uso de fondos y desempeño.	124
5. Valoración y ROI	125
a. Métodos de valoración en segunda vida.	125
b. Payback, VAN y TIR de estrategias circulares.	125
c. Sensibilidades y escenarios.	126
6. Cumplimiento y ética	126
a. Privacidad de datos y propiedad intelectual.	126
b. Trazabilidad y cadena de suministro responsable.	127
c. Transparencia y comunicación al mercado.	127
PARTE SEXTA.	128
Implementación, casos y herramientas	128
Capítulo 12: Roadmap de implantación y gestión del cambio	128
FORMULARIO Nº 01 — Diagnóstico de madurez de circularidad digital (procesos y datos).....	128
Sección 1 — Datos generales del diagnóstico	128
Sección 2 — Evaluación de procesos y datos (a)	128
Sección 3 — Inventario modular y brechas (b)	129
Sección 4 — Priorización de quick wins (c)	129
Sección 5 — Cierre y control	129
2. CHECKLIST — Diseño de piloto de gemelo digital y circularidad	130
Sección 1 — Alcance, hipótesis y métricas (a).....	130
Sección 2 — Arquitectura mínima viable (b)	130
Sección 3 — Plan de riesgos y calidad (c)	130
FORMULARIO Nº 03 — Plan de escalado y gobierno (DTO).....	131
Sección 1 — Blueprint organizativo y roles (a).....	131
Sección 2 — Catálogo de estándares internos (b).....	131
Sección 3 — Oficina del gemelo digital (DTO) (c)	131
Sección 4 — Roadmap de escalado	131
CHECKLIST — Habilitación de capacidades (formación, CoP y conocimiento)	132

Sección 1 — Formación y certificaciones (a)	132
Sección 2 — Comunidades de práctica (b)	132
Sección 3 — Gestión del conocimiento (c)	132
FORMULARIO Nº 05 — Gestión del cambio y adopción	133
Sección 1 — Patrocinio ejecutivo y narrativa de valor (a)	133
Sección 2 — Comunicación y adopción por equipos (b)	133
Sección 3 — Indicadores de adopción y refuerzo (c)	133
CHECKLIST — Casos prácticos comparados (construcción, energía/industria, eventos).....	133
Sección 1 — Construcción/edificación modular (a)	133
Sección 2 — Energía/industria y microinstalaciones (b)	134
Sección 3 — Infraestructuras temporales y eventos (c).....	134
Capítulo 13: Checklists y Formularios a texto completo.....	135
CHECKLIST — Evaluación y aptitud para reutilización	135
Sección 1 — Estado estructural/MEP y seguridad (a)	135
Sección 2 — Vida remanente y compatibilidad (b)	136
Sección 3 — Documentación mínima y evidencias (c)	136
FORMULARIO Nº 02 — Pasaporte Digital de Producto (DPP) — Unidad individual	136
Sección 1 — Identificación, composición y desmontabilidad (a)	136
Sección 2 — Historial de O&M y modificaciones (b)	137
Sección 3 — Conexión con inventario y gemelo (c)	137
FORMULARIO Nº 03 — Planificación de reconfiguración	138
Sección 1 — Alcance, interfaces y pruebas (a)	138
Sección 2 — Recursos, plazos y costes previstos (b)	138
Sección 3 — Criterios de aceptación y calidad (c)	138
FORMULARIO Nº 04 — Matriz de decisión para reubicación.....	139
Sección 1 — Criterios (coste, plazo, riesgo, impacto) (a)	139
Sección 2 — Ponderaciones y umbrales (b)	139
Sección 3 — Registro de decisión y trazabilidad (c)	139
FORMULARIO Nº 05 — Hoja de cálculo de KPIs y ACV (resumen mensual).....	140
Sección 1 — Indicadores técnicos/económicos/ambientales (a)	140
Sección 2 — Datasets y factores por defecto (b)	140
Sección 3 — Tablas de reporte periódico (c)	140
FORMULARIO Nº 06 — Plantillas de contrato y anexos técnicos.....	141
Sección 1 — Requisitos de información (entregables) (a).....	141
Sección 2 — KPIs, SLAs y régimen sancionador/incentivos (b)	141
Sección 3 — Cláusulas de datos, seguridad y acceso al gemelo (c).....	141
Capítulo 14: Arquitectura de referencia e integración para gemelos de circularidad modular	142
1. Plan de integración con sistemas existentes	142
a. Inventario de aplicaciones (BIM/PLM/ERP/EAM/IoT)	142
b. Estrategia de APIs y eventos.	143
c. Gobernanza de “fuente única de verdad”	143
2. Migración y saneado de datos	144
a. Descubrimiento, perfilado y calidad.....	144
b. Mapas de datos y correspondencias.	144
c. Ensayos de migración y criterios de aceptación.	144

3. Despliegue cloud-edge y conectividad OT/IT	145
a. Patrones de arquitectura (hub-and-spoke, federada).....	145
b. Conectividad segura y latencias objetivo.	145
c. Resiliencia y operación en modo degradado.....	145
4. Observabilidad y operación de la plataforma del gemelo	146
a. Telemetría, logging y trazabilidad.	146
b. SRE/DevOps: SLIs, SLOs y gestión de incidencias.	146
c. Backups, restauración y pruebas de recuperación.....	146
5. Cutover y reversibilidad	147
a. Plan de paso a producción y rollback.	147
b. Gestión de ventanas y congelaciones.	147
c. Estrategia de salida y mitigación de lock-in.....	147
6. Ciberresiliencia aplicada.....	148
a. Control de acceso por rol y secretos.	148
b. Endurecimiento de dispositivos y segmentación.	148
c. Plan de respuesta a incidentes con el gemelo.....	148

Capítulo 15: Herramientas, ecosistema y evaluación tecnológica para reutilizar, reconfigurar y reubicar

1. Plataformas de gemelo digital y modelado	149
a. Capacidades imprescindibles y límites.	149
b. Integración con simulación y analítica.	150
c. Criterios de selección y pruebas de concepto.	150
2. EAM/CMMS e integración operativa	151
a. Órdenes, repuestos y garantías conectadas.....	151
b. Flujos móviles y captura en campo.	151
c. Interoperabilidad con DPP y “as-maintained”.	152
3. IoT/streaming y edge analytics	152
a. Pasarelas, protocolos y buffering.	152
b. Gestión de dispositivos y firmware.	152
c. Pipelines de datos en tiempo real.	153
4. Analítica, ACV y ciencia de datos	153
a. Modelos de degradación y RUL.	153
b. Cálculo de ACV y CO ₂ e integrado.	154
c. Catalogación y linaje de modelos.	154
5. Interoperabilidad y low-code	154
a. ETL/ELT, orquestación y catálogos.	154
b. Conectores, IDS/MVD y validaciones.	155
c. Componibilidad con low-code/no-code.	155
6. Coste total y licenciamiento	155
a. TCO de plataforma y escalado.....	155
b. Modelos de licencias y consumo.....	156
c. Métricas de valor y “payback” tecnológico.	156

Capítulo 16: Laboratorio de pruebas, certificación y playbooks de implantación

1. Testbeds y HIL/SIL para módulos	157
a. Bancadas y emuladores de entorno.	157

b. Calibración de modelos con datos reales.....	159
c. Validación de interfaces y control.....	160
2. QA de datos, modelos y DPP	161
a. Reglas de calidad y umbrales.....	161
b. Pruebas automatizadas (unitarias/integración).....	162
c. Auditorías de linaje y reproducibilidad.....	163
3. Ensayos FAT/SAT estandarizados.....	163
a. Protocolos y criterios de aceptación.....	163
b. Evidencias y firmas digitales.....	164
c. Matriz de no conformidades y cierres.....	165
4. Seguridad y pentesting operacional	166
a. Pruebas de intrusión OT/IT.....	166
b. Evaluación de exposición y hardening.....	166
c. Drills de respuesta y coordinación.....	167
5. Playbooks de incidentes y continuidad	168
a. Escenarios, triggers y roles.....	168
b. Comunicación y stakeholders.....	168
c. Revisión post mortem y mejoras.....	169
6. Certificación y homologación	170
a. Conformidad sectorial y normativa.....	170
b. Sellos internos de “listo para reuso”.....	171
c. Reconocimiento por tercera parte y seguros.....	171
PARTE SÉPTIMA.....	173
Práctica de Gemelos Digitales y Economía Circular: reutilizar, reconfigurar y reubicar unidades modulares	173
Capítulo 17: Casos prácticos ampliados y replicables de circularidad modular.....	173
1. Edificación modular y “fit-out” reconfigurable	173
a. Diseño DfD y pasaportes digitales.....	173
b. Reutilización y commissioning acelerado.....	174
c. KPIs técnicos/económicos/ambientales.....	174
2. Industria/Energía: skids y microinstalaciones.....	175
a. Reuso y upgrades de control.....	175
b. Reubicación multi-sitio con SLAs.....	175
c. ACV comparado y TCO.....	176
3. Infraestructuras temporales y eventos	176
a. Logística inversa y embalajes reutilizables.....	176
b. Seguridad, permisos y commissioning exprés.....	176
c. Métricas de disponibilidad y satisfacción.....	177
4. Educación/sanidad modular	177
a. Requisitos regulatorios y trazabilidad.....	177
b. Flujos críticos de O&M y garantías.....	177
c. Resultados y lecciones.....	178
5. Microcentros de datos/edge y microgrids	178
a. Reconfiguración eléctrica y térmica.....	178
b. Ciberresiliencia y monitorización.....	178
c. KPIs de eficiencia y continuidad.....	179

6. Síntesis de patrones replicables.....	179
a. Antipatrones y riesgos comunes.	179
b. Factores críticos de éxito.....	180
c. Plantillas y checklists aplicadas.....	180

Capítulo 18: Casos prácticos de Gemelos Digitales y Economía Circular: reutilizar, reconfigurar y reubicar unidades modulares181

Caso práctico 1. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Reutilización de aulas modulares con pasaporte digital mínimo viable.181

Causa del Problema	181
Soluciones Propuestas.....	181
1. Inventario rápido y creación de un Pasaporte Digital Mínimo Viable (DPP-MV)	181
2. Evaluación de aptitud para reutilización y vida remanente con gemelo "ligero"	182
3. Plan de reubicación escalonado y logística inversa trazable	182
4. Reacondicionamiento focalizado y kits de actualización	182
5. Cuadro de mando de circularidad y cuenta de resultados del proyecto	183
Consecuencias Previstas.....	183
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	183
Lecciones Aprendidas.....	184

Caso práctico 2. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Reconfiguración de módulos sanitarios en alojamientos temporales de alta eficiencia.186

Causa del Problema	186
Soluciones Propuestas.....	186
1. Gemelo digital de variantes y reglas paramétricas ("configurador 80/20")	186
2. Kit de reconfiguración seca con diseño para desmontaje (DfD) y "pasaporte de subcomponente"	187
3. Simulación de desempeño energético, acústico y de seguridad con el gemelo	187
4. Plan director de obra "takt-time" en dos trenes de trabajo y logística inversa	188
5. Contrato por desempeño y cuadro de mando de circularidad	188
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	189
Lecciones Aprendidas.....	190

Caso práctico 3. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Integración de gemelo digital para reubicación de oficinas modulares de alta tecnología.192

Causa del Problema	192
Soluciones Propuestas.....	192
1. Creación de un gemelo digital integral antes del desmontaje.....	192
2. Plan logístico internacional con normativa multipaís	192
3. Programa de reacondicionamiento predictivo	192
4. Contrato basado en KPIs de circularidad	193
Consecuencias Previstas.....	193
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	193
Lecciones Aprendidas.....	193

Caso práctico 4. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Conversión de módulos de oficinas en laboratorios de investigación de energía renovable.195

Causa del Problema	195
Soluciones Propuestas.....	195

1. Gemelo digital de alta fidelidad con integración IoT	195
2. Diseño de sistemas de ventilación y climatización especializados	195
3. Reacondicionamiento estructural y de aislamiento térmico-acústico	195
4. Optimización energética y sistema eléctrico redundante	196
5. Contrato de desempeño con KPIs de circularidad y eficiencia	196
Consecuencias Previstas	196
Resultados de las Medidas Adoptadas	196
Lecciones Aprendidas	197

Caso práctico 5. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Reconversión de módulos residenciales en centro de formación profesional.198

Causa del Problema	198
Soluciones Propuestas	198
1. Gemelo digital colaborativo	198
2. Rediseño funcional y accesible	198
3. Mejora de eficiencia energética	198
4. Instalación de infraestructura digital	199
5. Contrato de ejecución con KPIs de circularidad	199
Consecuencias Previstas	199
Resultados de las Medidas Adoptadas	199
Lecciones Aprendidas	200

Caso práctico 6. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Transformación de módulos hospitalarios en centro de innovación empresarial.....201

Causa del Problema	201
Soluciones Propuestas	201
1. Gemelo digital integral y federado	201
2. Rediseño interior para espacios de coworking	201
3. Optimización energética y certificación ambiental	201
4. Reacondicionamiento y trazabilidad de materiales	202
5. Contrato de obra basado en KPIs de circularidad y eficiencia	202
Consecuencias Previstas	202
Resultados de las Medidas Adoptadas	202
Lecciones Aprendidas	203

Caso práctico 7. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Adaptación de módulos de alojamiento temporal en centro cultural y biblioteca pública.204

Causa del Problema	204
Soluciones Propuestas	204
1. Creación de un gemelo digital integral con enfoque comunitario	204
2. Rediseño funcional y acústico	204
3. Mejora de eficiencia energética y confort térmico	204
4. Accesibilidad universal	205
5. Contrato con KPIs de circularidad y participación ciudadana	205
Consecuencias Previstas	205
Resultados de las Medidas Adoptadas	205
Lecciones Aprendidas	206

Caso práctico 8. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Reconversión de módulos de oficinas portuarias en centro de formación marítima.....207

Causa del Problema	207
Soluciones Propuestas.....	207
1. Gemelo digital completo con simulación de cargas dinámicas.....	207
2. Reforzamiento estructural y cimentaciones especiales.....	207
3. Adaptación de instalaciones MEP y tecnología de simulación	207
4. Optimización energética y sostenibilidad	208
5. Contrato basado en KPIs de circularidad y eficiencia	208
Consecuencias Previstas.....	208
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	208
Lecciones Aprendidas.....	209

Caso práctico 9. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Conversión de módulos logísticos en centro de datos

sostenible.....210

Causa del Problema	210
Soluciones Propuestas.....	210
1. Gemelo digital de alta precisión para infraestructura crítica.....	210
2. Reforzamiento estructural y suelos técnicos	210
3. Sistema eléctrico redundante y refrigeración de precisión	210
4. Optimización energética y energías renovables	211
5. Contrato de obra con KPIs de circularidad y eficiencia energética	211
Consecuencias Previstas.....	211
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	211
Lecciones Aprendidas.....	212

Caso práctico 10. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Reubicación de aulas modulares universitarias para un campus en crecimiento.....213

Causa del Problema	213
Soluciones Propuestas.....	213
1. Gemelo digital de flota y planificación logística.....	213
2. Revisión y actualización de instalaciones.....	213
3. Plan de desmontaje y embalaje sostenible.....	213
4. Montaje y commissioning en destino	214
5. Contrato de obra basado en KPIs de circularidad y eficiencia	214
Consecuencias Previstas.....	214
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	214
Lecciones Aprendidas.....	215

Caso práctico 11. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Reconversión de módulos de emergencia en centro de investigación agroalimentaria.216

Causa del Problema	216
Soluciones Propuestas.....	216
1. Gemelo digital para entornos de bioseguridad	216
2. Reconfiguración modular para laboratorios e invernaderos	216
3. Optimización energética y uso de energías renovables.....	216
4. Sistema de bioseguridad avanzado.....	217
5. Contrato con KPIs de circularidad y sostenibilidad	217
Consecuencias Previstas.....	217
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	217
Lecciones Aprendidas.....	218

Caso práctico 12. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y

REUBICAR UNIDADES MODULARES." Reconversión de módulos de feria internacional en centro de emprendimiento tecnológico.219

Causa del Problema	219
Soluciones Propuestas.....	219
1. Gemelo digital con trazabilidad post-evento	219
2. Rediseño funcional y acústico	219
3. Integración audiovisual y tecnológica	219
4. Optimización energética y certificación verde	220
5. Contrato de obra con KPIs de circularidad	220
Consecuencias Previstas.....	220
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	220
Lecciones Aprendidas	221

Caso práctico 13. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Reacondicionamiento de módulos escolares en centro de innovación agrícola.....222

Causa del Problema	222
Soluciones Propuestas.....	222
1. Gemelo digital ambiental y de proceso	222
2. Reconfiguración para laboratorios y salas de cultivo	222
3. Sistema de climatización y control de humedad de alta precisión	222
4. Optimización energética y energías renovables	223
5. Contrato de obra con KPIs de circularidad y eficiencia	223
Consecuencias Previstas.....	223
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	223
Lecciones Aprendidas	224

Caso práctico 14. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Traslado y adaptación de módulos de oficinas en centro de operaciones de energías renovables.....225

Causa del Problema	225
Soluciones Propuestas.....	225
1. Gemelo digital operativo y de mantenimiento predictivo	225
2. Reforzamiento de sistemas eléctricos y de comunicaciones	225
3. Mejora de aislamiento y eficiencia energética	225
4. Plan logístico de traslado y montaje escalonado	226
5. Contrato de obra con KPIs de circularidad y eficiencia	226
Consecuencias Previstas.....	226
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	226
Lecciones Aprendidas	227

Caso práctico 15. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Conversión de módulos de alojamiento turístico en residencia de estudiantes.....228

Causa del Problema	228
Soluciones Propuestas.....	228
1. Gemelo digital con gestión de ocupación	228
2. Adaptación a normativa urbana y de seguridad	228
3. Reforzamiento acústico y confort térmico.....	228
4. Optimización energética con energías renovables	229
5. Contrato basado en KPIs de circularidad y eficiencia	229
Consecuencias Previstas.....	229
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	229

Lecciones Aprendidas.....	230
Caso práctico 16. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Programa corporativo para transformar pop-ups minoristas en microhubs logísticos urbanos.	231
Causa del Problema.....	231
Soluciones Propuestas.....	231
1) Diagnóstico de madurez y quick wins.....	231
2) Diseño del piloto y arquitectura mínima viable.....	231
3) Integración y migración de datos con "fuente única de verdad"	232
4) Reconfiguración y aseguramiento técnico.....	232
5) Operación, observabilidad y SRE/DevOps	232
6) Ciberresiliencia aplicada y cumplimiento	232
7) Gobierno, DTO y gestión del cambio	233
8) Cutover, reversibilidad y cláusulas contractuales.....	233
Consecuencias Previstas.....	233
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	234
Lecciones Aprendidas.....	235
Caso práctico 17. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Red de refugios climáticos urbanos a partir de módulos de oficina reutilizados.	236
Causa del Problema.....	236
Soluciones Propuestas.....	236
1) Diagnóstico de madurez e inventario modular.....	236
2) Diseño del piloto y arquitectura mínima viable cloud-edge	236
3) Kit de reconfiguración DfD del refugio climático	237
4) Microred fotovoltaica y operación en isla	237
5) Integración con ecosistema municipal y contratos	237
6) Observabilidad, SRE y cuadros de mando.....	237
7) Laboratorio de pruebas y QA estandarizado	237
8) Gestión del cambio, DTO y reversibilidad	238
Consecuencias Previstas.....	238
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	238
Lecciones Aprendidas.....	239
Caso práctico 18. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Programa multinacional de reubicación de skids de tratamiento de agua industrial.....	241
Causa del Problema.....	241
Soluciones Propuestas.....	241
1) Diagnóstico de madurez, inventario modular y brechas	241
2) Diseño del piloto y arquitectura mínima viable del gemelo	241
3) Migración y saneado de datos con "fuente única de verdad"	242
4) Ensayos y certificación: testbeds, HIL/SIL y FAT/SAT estandarizados.....	242
5) Observabilidad, SRE/DevOps y KPIs integrados.....	242
6) Ciberresiliencia aplicada y hardening OT/IT	242
7) Cutover, reversibilidad y operación en modo degradado	243
8) Contratación con entregables de información y KPIs/SLAs	243
Consecuencias Previstas.....	243
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	243
Lecciones Aprendidas.....	244
Caso práctico 19. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y	

REUBICAR UNIDADES MODULARES." Reubicación y reconfiguración de contenedores BESS para balance estacional de red.246

Causa del Problema	246
Soluciones Propuestas.....	246
1) Diagnóstico de madurez e inventario modular con DPP de batería y sistema	246
2) Arquitectura del gemelo digital cloud–edge y “fuente única de verdad”	247
3) Reconfiguración eléctrica y térmica guiada por gemelo.....	247
4) Ensayos FAT/SAT, testbeds HIL/SIL y certificación de seguridad	247
5) Logística de reubicación y permisos	247
6) Observabilidad, analítica y SRE/DevOps	248
7) Ciberresiliencia OT/IT y plan de respuesta a incidentes	248
8) Contratación y governance: DTO, EIR/AIR y KPIs/SLAs	248
Consecuencias Previstas.....	248
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	249
Lecciones Aprendidas	250

Caso práctico 20. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Conversión de contenedores frigoríficos en microhubs de cadena de frío para salud y alimentación.....251

Causa del Problema	251
Soluciones Propuestas.....	251
1) Diagnóstico de madurez e inventario modular con DPP específico de cadena de frío	251
2) Arquitectura de gemelo digital cloud–edge con integridad de datos ALCOA+.....	252
3) Reacondicionamiento térmico y actualización de refrigeración a bajo GWP	252
4) Kit de reconfiguración DfD para doble uso salud–alimentación.....	252
5) Energía y EMS: microfotovoltaica y baterías con control térmico.....	252
6) QA de cadena de frío: mapeo térmico, FAT/SAT y validación operativa	253
7) Ciberresiliencia y cumplimiento.....	253
8) Contratación con entregables de información y KPIs/SLAs	253
Consecuencias Previstas.....	253
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	254
Lecciones Aprendidas	255

Caso práctico 21. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Plataforma federada y cutover sin parada para una cartera multinacional de módulos.....257

Causa del Problema	257
Soluciones Propuestas.....	257
1) Plan de integración con sistemas existentes y gobernanza de “fuente única de verdad”	257
2) Migración y saneado de datos con linaje y criterios de aceptación	257
3) Despliegue cloud–edge y conectividad OT/IT con resiliencia	258
4) Observabilidad y operación del gemelo (SRE/DevOps)	258
5) Cutover y reversibilidad (sin lock-in)	258
6) Ciberresiliencia aplicada	258
7) Catálogo de estándares internos y DTO (Oficina del Gemelo Digital)	259
8) Habilitación de capacidades y gestión del cambio	259
Consecuencias Previstas.....	259
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	259
Lecciones Aprendidas	260

Caso práctico 22. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Homologación multinorma con laboratorio de pruebas y certificación para módulos sanitarios y educativos reubicables.262

Causa del Problema	262
Soluciones Propuestas	262
1) Laboratorio de pruebas y banco HIL/SIL "gemelo del gemelo"	262
2) QA de datos, DPP y "fuente única de verdad"	262
3) Protocolos FAT/SAT estandarizados con firmas digitales	263
4) Ciberresiliencia OT/IT y pruebas de intrusión operacionales	263
5) Arquitectura cloud-edge y operación en modo degradado	263
6) ACV y KPIs de circularidad integrados en el gemelo	263
7) Playbooks de implantación y gestión del cambio	264
Consecuencias Previstas	264
Resultados de las Medidas Adoptadas	264
Lecciones Aprendidas	265

Caso práctico 23. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Programa transfronterizo de acogida social con teleasistencia a partir de módulos de obra reutilizados.267

Causa del Problema	267
Soluciones Propuestas	267
1) Diagnóstico de madurez e inventario modular con DPP mínimo	267
2) Diseño del piloto y arquitectura mínima viable cloud-edge	267
3) Reconfiguración DfD y normalización de interfaces	268
4) Cumplimiento normativo y accesibilidad universal	268
5) HVAC de alta eficiencia y control de calidad del aire	268
6) Observabilidad, SRE/DevOps y KPIs integrados	268
7) Ciberresiliencia y protección de datos	268
8) QA estandarizado: FAT/SAT y laboratorio de pruebas	269
9) Contratos con KPIs/SLAs y entregables de información	269
Consecuencias Previstas	269
Resultados de las Medidas Adoptadas	269
Lecciones Aprendidas	271

Caso práctico 24. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Orquestación multi-sede para un campeonato deportivo continental con módulos reconfigurables.272

Causa del Problema	272
Soluciones Propuestas	272
1) Gemelo de red y demanda	272
2) Optimización de asignación y ruteo multi-criterio	272
3) Reconfiguración DfD con kits estandarizados	272
4) Arquitectura cloud-edge y operación en modo degradado	273
5) QA y laboratorio de pruebas con FAT/SAT y HIL/SIL	273
6) Ciberresiliencia y seguridad integrada	273
7) Energía y microredes temporales de baja huella	273
8) DPP unificado, ACV y reporting de circularidad	273
9) Contratación PaaS/Leasing circular con KPIs/SLAs	274
10) Gestión del cambio y playbooks	274
Consecuencias Previstas	274
Resultados de las Medidas Adoptadas	274
Lecciones Aprendidas	275

Caso práctico 25. "GEMELOS DIGITALES Y ECONOMÍA CIRCULAR: REUTILIZAR, RECONFIGURAR Y REUBICAR UNIDADES MODULARES." Mercado paneuropeo de intercambio y leasing circular de módulos con pasaporte digital y valoraciones automatizadas.277

Causa del Problema	277
--------------------------	-----



Soluciones Propuestas.....	277
1) Marco de contratación y modelo de negocio circular	277
2) Arquitectura de referencia e integración	277
3) DPP europeo y ontologías comunes	278
4) Valorización y scoring circular con RUL	278
5) Laboratorio de certificación y QA estandarizado	278
6) Plan de migración y saneado de datos	278
7) Orquestación logística y reubicación multi-sitio	278
8) Observabilidad y SRE/DevOps de la plataforma	279
9) Ciberresiliencia y cumplimiento.....	279
10) Habilitación de capacidades y gestión del cambio	279
Consecuencias Previstas.....	279
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	280
Lecciones Aprendidas.....	280

¿QUÉ APRENDERÁ?



- Fundamentos de gemelos digitales aplicados a la economía circular.
- Diseño para desmontaje y modularidad funcional orientados a la reutilización.
- Ciclo de vida digital completo del módulo, del diseño al reuso.
- Arquitectura de datos, ontologías y pasaporte digital de producto.
- Estándares internacionales BIM/IFC y gestión colaborativa de la información.
- Estrategias de reutilización, reconfiguración y reubicación de módulos.
- Operación, mantenimiento predictivo y logística inversa para prolongar la vida útil.
- Medición de KPIs técnicos, económicos y ambientales con análisis de ACV.
- Modelos de negocio, contratación y financiación de proyectos modulares circulares.
- Implantación práctica: roadmap, gestión del cambio y escalado organizativo.
- Herramientas, plataformas y ecosistema tecnológico para gemelos digitales.
- Casos prácticos replicables y checklists completos para aplicación inmediata.

Introducción.



Las unidades modulares ya no son “proyectos de una sola vida”. Son activos reprogramables. Cuando añadimos gemelos digitales a la ecuación, cada módulo deja de ser un gasto que se agota en la obra y se convierte en un recurso con memoria, tracción económica y segundas (terceras, cuartas) vidas. Esta guía nace para ayudarle a capturar ese valor: reutilizar, reconfigurar y reubicar con rigor técnico, métricas claras y riesgo controlado.

No es un manifiesto, es un manual operativo. Reúne prácticas de ingeniería, gestión de activos, datos e interoperabilidad para que la circularidad sea rentable, auditable y escalable. Partimos de una premisa sencilla: si no existe el rastro digital —qué es el módulo, de qué está hecho, cómo ha rendido, qué le queda por vivir—, la circularidad se reduce a buenas intenciones. Con un gemelo digital bien gobernado, en cambio, usted decide con datos: qué módulo reusar, cómo reconfigurarlo, dónde reubicarlo y con qué garantías.

Esta guía está escrita para propietarios de activos, operadores, fabricantes, integradores digitales, aseguradoras y financiadores que quieren pasar de pilotos a programas. Le proponemos un camino paso a paso, desde el diseño para desmontaje y los pasaportes digitales hasta el commissioning del “nuevo” ciclo, con checklists, plantillas y casos replicables en edificación, industria, energía, educación, sanidad y eventos.

Lo que encontrará no son modas tecnológicas, sino decisiones trazables: qué dato guardar y por qué, qué estándar pedir en contrato, qué KPI medir para demostrar valor y cómo gestionar riesgos (técnicos, regulatorios, cibernéticos) sin frenar la velocidad del negocio. Si hoy su inventario está disperso, los datos son incompletos y la presión por reducir CAPEX/OPEX y huella ambiental crece, esta guía es su mapa.

La circularidad modular habilitada por gemelos digitales no es solo “hacer lo correcto”; es hacerlo medible, repetible y rentable. Al terminar, usted podrá apagar una obra sin apagar el valor y encender el siguiente ciclo con más conocimiento que el anterior. Ese es el nuevo estándar: cada módulo mejora con la experiencia. Aquí tiene el método para conseguirlo.