



CURSO/GUÍA PRÁCTICA COMMISSIONING (Cx) E INTEGRATED SYSTEMS TESTING (IST) EN OBRAS DE INGENIERÍA



Índice

¿QUÉ APRENDERÁ?	26
Introducción.	28
PARTE PRIMERA.	30
Marco estratégico del COMMISSIONING (Cx) E IST EN OBRAS DE INGENIERÍA	30
Capítulo 1: Fundamentos del Cx/IST en infraestructuras, plantas y transporte	30
1. Alcance, definiciones y límites de Cx/IST	30
a. Commissioning vs. puesta en marcha vs. start-up.	30
b. Cx en ciclo de vida del activo: desde diseño a operación.....	31
c. Relación con QA/QC, pruebas de rendimiento y garantía.....	31
2. Objetivos del Cx/IST en ingeniería	31
a. Seguridad funcional, disponibilidad y resiliencia.....	31
b. Conformidad con requisitos operativos y de rendimiento.	32
c. Optimización de coste total de propiedad (TCO).	32
3. Fases y “gates” típicos en proyectos de ingeniería	32
a. Planificación, diseño (DfCx), construcción y pruebas.	32
b. FAT/IFAT, SAT/iSAT, IST y operaciones en prueba.	33
c. Aceptación provisional, definitiva y garantía.....	33
4. Roles y responsabilidades (promotor, contratista, CxA/CxM)	33
a. Matriz RACI y cadena de decisión.....	33
b. Coordinación con O&M y operador final.	34
c. Integración con equipos de seguridad y calidad.....	34
5. Marco metodológico y estándares de referencia	34
a. V-Model, RAMS y safety case.	34
b. ISO 9001/55001/19650 y marcos IEC aplicables (visión general).	35
c. KPIs de desempeño y SLAs operativos.....	35
6. Plan Director de Cx/IST del proyecto	35
a. Estructura, contenidos mínimos y criterios de éxito.	35
b. Estrategia de datos y trazabilidad.	36
c. Gestión de riesgos y contingencias de pruebas.....	36
Capítulo 2: Requisitos operativos y diseño para el Commissioning (DfCx)	37
1. OPR/OR (Operational Requirements) y BOD (Basis of Design)	37
a. Captura de requisitos funcionales y de rendimiento.	37
b. Trazabilidad de requisitos a pruebas.....	38
c. Alineación con operación y mantenimiento.....	38
2. Estrategia de diseño orientada a pruebas	38
a. Diseñabilidad para FAT/SAT/IST.	38
b. Segmentación por sistemas y subsistemas.	39
c. Puntos de prueba, puntos de inyección/medida y bypass.	39
3. Gestión de interfaces (ICD) y configuración	39
a. Identificación y control de interfaces críticas.....	39

b. Gestión de cambios y baseline técnico.	40
c. Versionado y control de configuración.	40
4. Criterios de aceptabilidad y matrices de cumplimiento	40
a. Definición de criterios “go/no-go”.	40
b. Matrices de verificación y validación.	41
c. Evidencias objetivas y registros.	41
5. Planificación de recursos y logística de pruebas	41
a. Equipos de medida y calibración.	41
b. Ventanas de prueba y restricciones operativas (SIMOPS).	42
c. Coordinación con terceros y autoridades.	42
6. Riesgos técnicos y operativos en el DfCx	42
a. Modos de fallo y mitigaciones.	42
b. Pruebas tempranas y maquetas/HIL-SIL.	43
c. Presupuesto de contingencias (coste e importe).	43
PARTE SEGUNDA.....	44
Calidad, trazabilidad e interfaces técnicas	44
Capítulo 3: QA/QC aplicado al Cx/IST y gestión documental	44
1. Plan de calidad de pruebas (QA) y control (QC)	44
a. Procedimientos y formatos de inspección.	44
b. Ensayos de recepción vs. desempeño.	45
c. Evidencias y conformidades.	45
2. Trazabilidad extremo a extremo.....	45
a. Requisito → diseño → prueba → evidencia.	45
b. Etiquetado/asset register y jerarquías.	46
c. Sistemas de gestión documental (DMS/EDMS).	46
3. No conformidades (NCR), punch list y seguimiento	47
a. Registro, clasificación y priorización.	47
b. Acciones correctivas y verificación de cierre.	47
c. Reportes ejecutivos y métricas.	47
4. Gestión del cambio durante pruebas	48
a. Baseline, desviaciones y aprobaciones.	48
b. Impacto en coste, plazo y riesgo.	48
c. Comunicación con partes interesadas.	48
5. Aseguramiento metrológico	49
a. Calibración, incertidumbre y certificados.	49
b. Ensayos comparativos y repetibilidad.	49
c. Laboratorios y acreditaciones.	49
6. Auditorías internas y externas de Cx/IST.....	50
a. Preparación, alcance y evidencias.	50
b. Hallazgos y planes de mejora.	50
c. Lecciones aprendidas.	50
Capítulo 4: Gestión de interfaces técnicas y V-Model en ingeniería	51
1. Descomposición de sistemas y arquitectura.....	51
a. Sistemas, subsistemas y paquetes.....	51

b. Interoperabilidad OT/IT/Comunicaciones.....	52
c. Matrices de compatibilidad.....	52
2. V-Model aplicado a Cx/IST	53
a. Verificación vs. validación.....	53
b. Planes y casos de prueba por nivel.....	53
c. Aceptación progresiva.....	53
3. Interfaz eléctrica y de control	54
a. Alimentación, protecciones y selectividad.....	54
b. PLC/DCS/SCADA y protocolos.....	54
c. Redundancias y failover.....	55
4. Interfaz mecánica y de procesos	55
a. Fluidos, instrumentación y lazos.....	55
b. Seguridad de procesos y paradas (SIS/ESD).....	55
c. Condiciones de diseño vs. operación.....	56
5. Ciberseguridad en interfaces OT	56
a. Segmentación de redes y accesos.....	56
b. Endurecimiento y logging.....	56
c. Pruebas de seguridad en entorno de pruebas.....	56
6. Coordinación con proveedor y operador final	57
a. Requisitos de interoperabilidad.....	57
b. Pruebas de aceptación conjuntas.....	57
c. Transferencia de responsabilidades.....	57
PARTE TERCERA.....	58
Protocolos FAT/IFAT y SAT/iSAT	58
Capítulo 5: FAT/IFAT (pruebas en fábrica) y preparación de sitio	58
1. Plan FAT/IFAT por paquete y proveedor	58
a. Criterios de aceptación y límites.....	58
b. Medios de prueba y simuladores.....	59
c. Seguridad y responsabilidades.....	59
2. Procedimientos FAT/IFAT	60
a. Secuencias, listas de verificación y registros.....	60
b. Pruebas funcionales y de estrés.....	60
c. Conectividad y comunicaciones.....	60
3. Gestión de incidencias y repeticiones	61
a. NCR en fábrica y correcciones.....	61
b. Reensayos y aceptación condicionada.....	61
c. Impacto en plazo y coste.....	62
4. Empaquetado, transporte y preservación	62
a. Conservación y sellado.....	62
b. Condiciones ambientales y de choque.....	62
c. Evidencias y cadena de custodia.....	63
5. Precomisionado en obra (previo a SAT)	63
a. Inspecciones mecánicas y eléctricas.....	63
b. Limpiezas, flushing y pruebas de estanqueidad.....	63
c. Energización segura (pre-checks).....	63

6. Alineamiento FAT→SAT	64
a. Trazabilidad de casos FAT a SAT.	64
b. Requisitos de sitio y prerequisites.	64
c. Ajustes por condiciones reales.	64
Capítulo 6: SAT/iSAT (sitio) y pruebas funcionales en campo	65
1. Plan SAT/iSAT por sistemas	65
a. Loop checks e integración.	65
b. Redes, tagging y direccionamiento.	66
c. Herramientas de diagnóstico.	66
2. Energización y pruebas eléctricas	67
a. Aislamiento, continuidad y protecciones.	67
b. Selectividad y coordinación.	67
c. Transferencias y back-up power.	68
3. Pruebas mecánicas y de proceso	68
a. Rotativos, alineaciones y vibraciones.	68
b. Caudales, presiones y temperaturas.	68
c. Válvulas, actuadores y lazos.	69
4. Funcionales y rendimiento en sitio	69
a. Secuencias automáticas y manuales.	69
b. Soak tests y ramp-up.	70
c. Stress tests y capacidad.	70
5. Seguridad operacional y permisos de trabajo	71
a. LOTO, PTW y SIMOPS.	71
b. Emergencias y vías de escape.	71
c. Coordinación HSE.	71
6. Cierre SAT y readiness para IST	72
a. Documentación y evidencias.	72
b. Criterios “go/no-go” a IST.	72
c. Lecciones y ajustes.	72
PARTE CUARTA.	74
IST (INTEGRATED SYSTEMS TESTING) Y OPERACIONES EN PRUEBA	74
Capítulo 7: Planificación del IST y diseño de escenarios integrados	74
1. Alcance y objetivos del IST	74
a. Validación end-to-end.	74
b. Interacciones multisitio/multisistema.	75
c. Continuidad del servicio.	75
2. Matriz de escenarios y casos de uso	75
a. Operativos normales y anómalos.	75
b. Fallos, degradados y recuperación.	76
c. Mantenimiento y turnaround.	76
3. Preparación de entorno y datos	77
a. Simuladores, HIL/SIL.	77
b. Datos de prueba y ciberseguridad.	77
c. Instrumentación temporal.	77

4. Recursos, roles y comunicaciones	78
a. Director de pruebas y jefes de sistemas.....	78
b. Sala de control y field crews.....	78
c. Protocolos de comunicación.....	78
5. Gestión de riesgos y contingencias IST	79
a. Evaluación previa y mitigaciones.....	79
b. Planes de emergencia y retorno.	79
c. Ventanas y bloqueos operativos.....	79
6. Criterios de éxito y reporting	80
a. Métricas y KPIs IST.....	80
b. Evidencias y videos/logs.....	80
c. Actas y consensos.....	80
Capítulo 8: Ejecución del IST, trial operations y aceptación integrada	81
1. Ejecución guiada por guiones (scripts)	81
a. Secuencias paso a paso.	81
b. Roles y autorizaciones.....	82
c. Registro en tiempo real.	82
2. Eventos críticos y pruebas de resiliencia	83
a. Black-start y pérdida total/parcial.....	83
b. Failover/failback y islas.....	83
c. Ciberincidentes simulados.....	83
3. Coordinación con el operador final	84
a. Entrenamiento on-the-job.....	84
b. Protocolos y manuales operativos.....	84
c. Gestión de desviaciones.....	84
4. Operaciones en prueba (trial ops).....	85
a. Periodo de estabilización.....	85
b. Curva de aprendizaje y soporte.....	85
c. Ajustes finos y optimización.....	85
5. Cierre de IST y aceptación	86
a. Punch list residual y remates.....	86
b. Aprobación de criterios integrados.....	86
c. Handover provisional.....	86
6. Lecciones aprendidas y mejora continua.....	87
a. REX y base de conocimiento.....	87
b. Retroalimentación a diseño.....	87
c. Estandarización de scripts.....	87
PARTE QUINTA.	88
Seguridad, RAMS y ciberseguridad en Cx/IST	88
Capítulo 9: RAMS, safety case y continuidad de servicio en pruebas	88
1. Conceptos RAMS y criticidad	88
a. Disponibilidad, fiabilidad y mantenibilidad.....	88
b. MTBF/MTTR y SLA.....	89
c. Modos de fallo críticos.....	89

2. Safety case aplicado a pruebas	89
a. Argumentos y evidencias.....	89
b. Gestión de riesgos residuales.....	90
c. Aprobaciones y sign-offs.....	90
3. Integridad de seguridad y paradas	90
a. Lógicas ESD/SIS.....	90
b. Tests periódicos y pruebas de demanda.....	91
c. Bypass seguro y restauración.....	91
4. Continuidad y planes de contingencia.....	91
a. Redundancias activas/pasivas.....	91
b. Reposición de servicio.....	91
c. Comunicación de crisis.....	92
5. Integración HSE en Cx/IST	92
a. PTW, LOTO y permisos especiales.....	92
b. Espacios confinados y energías peligrosas.....	92
c. Protección contra incendios en pruebas.....	92
6. Métricas RAMS en aceptación	93
a. Pruebas de disponibilidad.....	93
b. Curvas de bañera y confiabilidad.....	93
c. Criterios de aceptación RAMS.....	93
Capítulo 10: Ciberseguridad OT en pruebas integradas.....	94
1. Gobierno y responsabilidades	94
a. Roles OT/IT y segregación.....	94
b. Gestión de accesos y credenciales.....	94
c. Trazabilidad de acciones.....	95
2. Arquitectura y segmentación	95
a. Zonas y conductos.....	95
b. DMZ y bastionado.....	95
c. Inventario y parches.....	96
3. Seguridad de comunicaciones	96
a. Protocolos y cifrado.....	96
b. Detección de intrusiones.....	96
c. Telemetría y registros.....	96
4. Pruebas de seguridad durante Cx/IST	97
a. Escenarios realistas sin impacto.....	97
b. Pruebas de recuperación.....	97
c. Gestión de vulnerabilidades.....	97
5. Respuesta a incidentes en pruebas	98
a. Playbooks y notificación.....	98
b. Contención y erradicación.....	98
c. Post-mortem y mejoras.....	98
6. Alineación con aceptación.....	99
a. Criterios mínimos de ciberseguridad.....	99
b. Entregables y evidencias.....	99
c. Plan de hardening post-handover.....	99

PARTE SEXTA.	100
Handover digital, gemelo operativo y O&M readiness	100
Capítulo 11: Entrega digital (ISO 19650) y datos para operación	100
1. Estrategia de información y data drops.....	100
a. EIR/AIR y IDM.	100
b. Requisitos de datos por hito.	101
c. Calidad de datos y validación.	101
2. Modelos, IFC y federación	102
a. Entorno común de datos (CDE).	102
b. Identificadores únicos y revisiones.	102
c. Enlaces a documentación técnica.....	102
3. COBie y registro de activos	103
a. Campos obligatorios y relaciones.	103
b. Carga al EAM/GMAO.	103
c. Verificación y cierre de brechas.....	104
4. Manuales, O&M y formación.....	104
a. Procedimientos operativos.....	104
b. Programas de mantenimiento.....	104
c. Planes de formación y certificación.	105
5. Gemelo operativo y monitoreo	105
a. Datos en vivo y KPIs.	105
b. Alarmas y FDD.	105
c. Integración con SCADA/BMS/DCIM.....	106
6. Transferencia y garantías	106
a. Handover provisional y final.....	106
b. Período de garantía y pruebas estacionales.....	106
c. Plan de mejora continua.....	107
Capítulo 12: Economía del handover y transición a explotación	108
1. Coste e importe asociados a datos y capacitación	108
a. Presupuesto de cierre digital.....	108
b. Curva de madurez operativa.	109
c. Beneficios OPEX.	110
2. Gestión de repuestos críticos y logística.....	110
a. Niveles de servicio y stock.	110
b. Criterios de criticidad.	111
c. Plan de adquisición.	111
3. Contratos de mantenimiento y SLAs	112
a. KPIs y penalizaciones.	112
b. Ventanas de intervención.	112
c. Coordinación con operador.	113
4. Optimización post-arranque	113
a. Ajustes de control y eficiencia.....	113
b. Pruebas de rendimiento continuas.	113
c. Programas de mejora.	114

5. Riesgos post–handover	114
a. Pérdida de conocimiento.....	114
b. Cambios no controlados.....	114
c. Obsolescencia temprana.....	115
6. Cierre administrativo y documental.....	115
a. As-built y conformidades.....	115
b. Certificados y legalizaciones.....	115
c. Archivo digital.....	115
PARTE SÉPTIMA.....	117
Cx/IST por sectores de ingeniería	117
Capítulo 13: Transporte ferroviario, metro y túneles.....	117
1. Señalización, energía y material rodante (interfaces)	117
a. SCADA, telecomunicaciones y billete.....	117
b. Ventilación y extracción.....	118
c. Protección contra incendios.....	118
2. Estrategia FAT/SAT/IST ferroviaria	118
a. Plataformas de ensayo.....	118
b. Integración ERTMS/CBTC (visión general).....	119
c. Pruebas en línea y trial ops.....	119
3. Túneles: seguridad y ventilación.....	119
a. Centros de control y escenarios.....	119
b. Evacuación y alumbrado.....	120
c. Suministro eléctrico y UPS.....	120
4. Carreteras e ITS.....	120
a. SIE y paneles de mensaje variable.....	120
b. Aforo, CCTV y comunicaciones.....	120
c. Integración con centros de control.....	121
5. Resiliencia y continuidad de servicio.....	121
a. Desvíos y by-pass.....	121
b. Fallos de energía y conmutación.....	121
c. Ensayos de emergencia.....	121
6. Aceptación y KPIs sectoriales.....	122
a. Disponibilidad y puntualidad.....	122
b. Tiempos de recuperación.....	122
c. Seguridad operacional.....	122
Capítulo 14: Agua, proceso y plantas industriales.....	123
1. PLC/DCS, instrumentación y lazos.....	123
a. PIDs y control avanzado.....	123
b. Calidad de agua/proceso.....	124
c. Lazos críticos y ESD.....	124
2. FAT/SAT en proceso	125
a. Skids y paquetes.....	125
b. Limpiezas y flushing.....	125
c. Arranques graduales.....	125

3. IST de proceso	126
a. Secuencias y estados.	126
b. Balance materia/energía.	126
c. Pruebas de capacidad.	126
4. Seguridad de procesos	127
a. HAZOP/LOPA (visión práctica).	127
b. Pruebas de SIS.	127
c. Venting y alivio.	127
5. Integración con utilidades	128
a. Vapor, aire, nitrógeno.	128
b. Efluentes y emisiones.	128
c. Interfaz con terceros.	128
6. KPIs de operación	129
a. Producción y calidad.	129
b. Consumos específicos.	129
c. Paradas y mermas.	129
Capítulo 15: Energía, subestaciones, renovables y BESS.....	130
1. Subestaciones y protecciones	130
a. Esquemas y selectividad.	130
b. Relés y pruebas secundarias.	131
c. Comunicaciones y teleprotección.	131
2. Renovables y almacenamiento (BESS).....	131
a. Control de potencia y EMS.	131
b. Pruebas de seguridad y térmicas.	132
c. Integración con red.	132
3. Microredes y operación isla.....	132
a. Arranque negro y reconexión.	132
b. Estabilidad y calidad de energía.	133
c. Gestión de transitorios.	133
4. FAT/SAT/IST específicos de energía	133
a. Ensayos de carga y capacidad.	133
b. Conmutaciones y black-start.	134
c. Curvas y aceptación.	134
5. Ciberseguridad y telecontrol	134
a. Gestión de accesos y registros.	134
b. Monitorización de anomalías.	134
c. Planes de respuesta.	135
6. Métricas y aceptación	135
a. Disponibilidad y pérdidas.	135
b. THD y calidad de suministro.	135
c. Fiabilidad de conmutación.	135
PARTE OCTAVA.....	136
Organización, contratación y economía del Cx/IST	136
Capítulo 16: Organización, contratos y control económico del Cx/IST.....	136



1. Modelos contractuales y alcance Cx/IST	136
a. Definición de entregables y límites.	136
b. Interfaces con EPC/DB/CM.	137
c. Criterios de aceptación vinculantes.	137
2. Estructura del equipo de Cx/IST	137
a. CxA/CxM, líderes de sistema.	137
b. Soporte de proveedor y operador.	138
c. Competencias y certificaciones.	138
3. Plan de costes y financiación de pruebas	138
a. Presupuesto, importes y contingencias.	138
b. Curva de gasto y control.	139
c. Impacto en OPEX/beneficios.	139
4. Programación y riesgos de plazo	139
a. Cadena crítica y buffers.	139
b. Hitos y ventanas operativas.	140
c. Reprogramación por incidencias.	140
5. Gestión de terceros y suministros	140
a. Coordinación de proveedores.	140
b. Logística y repuestos críticos.	140
c. Penalizaciones y bonus.	141
6. Gobierno del proyecto y reporting	141
a. Comités y escalado.	141
b. Cuadros de mando y KPIs.	141
c. Auditoría y compliance.	141
PARTE NOVENA.	143
KPIs, aceptación, garantías y cierre	143
Capítulo 17: Métricas, aceptación y periodo de garantía	143
1. KPIs de pruebas y servicio	143
a. Disponibilidad, confiabilidad y tiempos.	143
b. Calidad de energía/proceso.	144
c. Seguridad y ciberseguridad.	144
2. Aceptación provisional y final	145
a. Criterios y evidencia necesaria.	145
b. Excepciones y reservas.	145
c. Protocolos de firma.	145
3. Pruebas de rendimiento y estacionales	146
a. Métodos, condiciones y correcciones.	146
b. Periodos de estabilización.	146
c. Repeticiones y umbrales.	146
4. Garantías y SLAs operativos	147
a. Coberturas y exclusiones.	147
b. Penalizaciones/incentivos.	147
c. Renovaciones y extensiones.	147
5. Cierre de NCR y punch list	148
a. Plan de eliminación de pendientes.	148

b. Verificación documental y en campo.....	148
c. Lecciones y estandarización.....	148
6. Post-handover y mejora continua.....	149
a. Rondas de optimización.....	149
b. Benchmarking y REX.....	149
c. Actualización de plantillas.....	149
PARTE DÉCIMA.....	150
HERRAMIENTAS DE COMMISSIONING (Cx) E INTEGRATED SYSTEMS TESTING (IST) EN OBRAS DE INGENIERÍA. CHECKLISTS Y FORMULARIOS.....	150
Capítulo 18: Plantillas maestras para el Plan de Cx/IST y RACI.....	150
FORMULARIO Nº 18.01 — Índice y estructura del Plan de Cx/IST (lista ready-to-use).....	150
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto.....	151
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia).....	151
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras.....	151
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo.....	152
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	152
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica).....	152
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI).....	152
Sección 8. Evidencias y referencias.....	152
FORMULARIO Nº 18.02 — Matriz RACI y roles por sistema.....	153
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto.....	153
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia).....	153
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras.....	153
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo.....	154
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	154
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica).....	154
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI).....	154
Sección 8. Evidencias y referencias.....	154
FORMULARIO Nº 18.03 — Matriz de interfaces (ICD).....	155
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto.....	155
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia).....	155
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras.....	155
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo.....	156
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	156
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica).....	156
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI).....	156
Sección 8. Evidencias y referencias.....	156
CHECKLIST Nº 18.04 — Readiness check (pre-FAT/SAT/IST).....	157
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto.....	157
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia).....	157
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras.....	157
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo.....	158
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	158
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica).....	158
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI).....	158
Sección 8. Evidencias y referencias.....	158
FORMULARIO Nº 18.05 — Gestión de NCR/punch list.....	159

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	159
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	159
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	159
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	160
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	160
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	160
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	160
Sección 8. Evidencias y referencias	160
CHECKLIST Nº 18.06 — Reportes ejecutivos de Cx/IST	161
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	161
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	161
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	161
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	162
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	162
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	162
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	162
Sección 8. Evidencias y referencias	162
Capítulo 19: Protocolos tipo y listas de verificación de pruebas.....	163
CHECKLIST Nº 19.01 — Paquete FAT/IFAT por tipo de equipo	163
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	163
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	164
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	164
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	164
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	165
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	165
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	165
Sección 8. Evidencias y referencias	165
CHECKLIST Nº 19.02 — Paquete SAT/iSAT en sitio.....	166
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	166
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	166
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	166
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	167
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	167
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	167
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	167
Sección 8. Evidencias y referencias	167
FORMULARIO Nº 19.03 — Scripts IST por escenarios	168
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	168
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	168
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	168
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	169
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	169
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	169
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	169
Sección 8. Evidencias y referencias	169
FORMULARIO Nº 19.04 — Formularios de resultados y evidencias	170
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	170
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	170
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	170

Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	171
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	171
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	171
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	171
Sección 8. Evidencias y referencias	171
CHECKLIST Nº 19.05 — Planes de contingencia y abort criteria	172
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	172
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	172
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	172
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	173
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	173
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	173
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	173
Sección 8. Evidencias y referencias	173
FORMULARIO Nº 19.06 — Cierre de pruebas y aceptación	174
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	174
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	174
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	174
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	175
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	175
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	175
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	175
Sección 8. Evidencias y referencias	175
Capítulo 20: Entregables digitales, COBie/EAM y KPIs de aceptación	176
FORMULARIO Nº 20.01 — Data drops ISO 19650 (plantilla).....	176
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	176
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	177
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	177
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	177
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	177
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	178
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	178
Sección 8. Evidencias y referencias	178
FORMULARIO Nº 20.02 — COBie: hojas obligatorias (plantillas)	178
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	178
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	179
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	179
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	179
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	179
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	180
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	180
Sección 8. Evidencias y referencias	180
FORMULARIO Nº 20.03 — Carga a EAM/GMAO y verificación	180
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	180
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	181
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	181
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	181
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	181
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	182

Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	182
Sección 8. Evidencias y referencias	182
CHECKLIST Nº 20.04 — Manuales O&M y formación (checklist).....	182
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	182
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	183
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	183
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	183
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	183
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	184
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	184
Sección 8. Evidencias y referencias	184
CHECKLIST Nº 20.05 — KPIs de aceptación y explotación	184
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	184
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	185
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	185
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	185
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	185
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	185
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	186
Sección 8. Evidencias y referencias	186
FORMULARIO Nº 20.06 — Handover y garantías (formularios).....	186
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	186
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	186
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	187
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	187
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	187
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	187
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	187
Sección 8. Evidencias y referencias	188
PARTE UNDÉCIMA.	189
PRÁCTICA DEL COMMISSIONING (Cx) E INTEGRATED SYSTEMS TESTING (IST) EN OBRAS DE INGENIERÍA	189
Capítulo 21: Casos comparados de Cx/IST en ingeniería.....	189
1. Ferrocarril/metro/túnel (end-to-end)	189
a. Contexto y alcance.	189
b. Retos y soluciones.	190
c. KPIs y resultados.	190
2. Agua/proceso (planta de tratamiento)	191
a. Paquetes y skids.	191
b. IST de secuencias.....	191
c. Optimización post-arranque.	191
3. Energía/subestación/BESS.....	192
a. Protección y telecontrol.	192
b. Black-start y pruebas.	192
c. Disponibilidad lograda.	192
4. Carreteras/ITS/centro de control.....	193
a. Integración de sistemas.....	193

b. Ensayos de seguridad	193
c. Métricas operativas	193
5. Puertos/aeropuertos (visión infra)	194
a. Coordinación multiagente	194
b. Trial operations	194
c. Lecciones clave	194
6. Comparativa con centros de datos (sin solapamiento)	194
a. Similitudes metodológicas	194
b. Diferencias de criticidad y IST	195
c. Remisiones a guía específica	195
Capítulo 22: Casos prácticos del Commissioning (Cx) e Integrated Systems Testing (IST) en obras de ingeniería	196
Caso práctico 1. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS." Implementación de un gemelo digital mínimo viable en una estación de bombeo con SCADA existente.	196
Causa del Problema	196
Soluciones Propuestas	196
1) Gobierno de datos operativo y taxonomía de señales	196
2) Conectividad desacoplada: OPC UA→MQTT (DMZ industrial) y time-stamping de calidad	197
3) Historian/TSDB híbrido con políticas de retención y downsampling	197
4) Gemelo digital operativo "ligero" (modelo híbrido físico-datos)	197
5) FDD (detección/diagnóstico de fallos) y workflows automáticos con CMMS	197
6) Optimización energética operativa (consignas y tarifas)	198
7) Ciberseguridad proporcional (IEC 62443 "lite") y acceso remoto seguro	198
8) IST/Comisionado digital de integraciones (FAT/SAT/SIT/IST)	198
Consecuencias Previstas	199
Resultados de las Medidas Adoptadas	199
Lecciones Aprendidas	200
Caso práctico 2. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS." Optimización de HVAC y calidad de aire mediante gemelo digital en un edificio de oficinas con BMS legado.	202
Causa del Problema	202
Soluciones Propuestas	202
1) Inventario y gobierno de datos BMS (semántica Brick/Haystack "lite")	202
2) Conectividad desacoplada BACnet/Modbus → MQTT/OPC UA + TSDB	202
3) Plataforma de series temporales y dashboards operativos/ejecutivos	203
4) Gemelo digital operativo "híbrido" para HVAC + IAQ	203
5) FDD multicapas (reglas + analítica) e integración con CMMS	203
6) Ventilación por demanda (DCV) y consignas adaptativas	204
7) Submetering y verificación de ahorros (M&V)	204
8) Ciberseguridad y continuidad operativa (IEC 62443 "proporcional")	204
9) IST (comisionado digital) de integraciones y traspaso a O&M	204
Consecuencias Previstas	205
Resultados de las Medidas Adoptadas	205
Lecciones Aprendidas	206
Caso práctico 3. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS." Integración DCIM-BMS-SCADA y gemelo térmico para mejorar PUE y resiliencia en un centro de datos de tamaño medio.	208
Causa del Problema	208

Soluciones Propuestas.....	208
1) Gobierno de datos y modelo común de activos (DCIM + semántica Brick/Haystack “adaptada” + DTDL)	208
2) Conectividad desacoplada y bus de eventos OT/IT (OPC UA/MQTT + DMZ industrial)	208
3) Plataforma de datos (TSDB + historizadores) y cuadros de mando unificados (PUE, térmico, eléctrico).....	209
4) Gemelo digital térmico-operativo de sala blanca (modelo híbrido: red térmica + CFD ligero)	209
5) FDD multicapas (HVAC + eléctrico) con workflows a DCIM/CMMS.....	209
6) Optimización térmica: confinamiento, baldosas y setpoints.....	209
7) Optimización de agua helada y torres (ΔT , secuenciación y free-cooling)	210
8) Integración eléctrica avanzada: UPS/STS/generadores en el gemelo (what-if)	210
9) M&V (medida y verificación) del PUE y reporting a dirección	210
10) Ciberseguridad proporcional (IEC 62443) y continuidad (RTO/RPO).....	210
11) IST/Comisionado digital de integraciones	211
Consecuencias Previstas.....	211
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	211
Lecciones Aprendidas	212

Caso práctico 4. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS." Optimización de aireación y resiliencia operativa en una planta de tratamiento de aguas mediante gemelo digital integrado con SCADA.214

Causa del Problema	214
Soluciones Propuestas.....	214
1) Gobierno de datos y semántica de proceso (OT Lead + IT Lead + O&M)	214
2) Conectividad desacoplada SCADA→plataforma (OPC UA/MQTT en DMZ industrial)	214
3) TSDB + cuadros de mando operativos y ejecutivos (energía/proceso/calidad)	215
4) Gemelo digital de proceso biológico (modelo híbrido ASM simplificado + datos)	215
5) FDD (detección/diagnóstico de fallos) para aireación e instrumentación.....	215
6) Control predictivo de aireación (MPC supervisado por gemelo).....	216
7) Gestión energética y respuesta a la demanda	216
8) Submetering selectivo y plan M&V (IPMVP B/C).....	216
9) Mantenimiento predictivo (CBM) de soplantes/válvulas/difusores	216
10) Ciberseguridad y continuidad (IEC 62443 “proporcional”)	217
11) IST/Comisionado digital y transferencia a O&M.....	217
Consecuencias Previstas.....	217
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	217
Lecciones Aprendidas	219

Caso práctico 5. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS." Ventilación por demanda y respuesta a emergencias con gemelo digital en un túnel carretero.221

Causa del Problema	221
Soluciones Propuestas.....	221
1) Gobierno de datos y semántica común por subsistema	221
2) Conectividad desacoplada y bus de eventos OT/IT (OPC UA → MQTT en DMZ)	222
3) TSDB y cuadros de mando operativos/ejecutivos (aire, visibilidad, energía, eventos)	222
4) Gemelo digital de ventilación y humo (modelo híbrido)	222
5) FDD para sensores, jet-fans, compuertas y alumbrado	222
6) Ventilación por demanda (DVC) y consignas adaptativas	223
7) Alumbrado adaptativo y curvas de luminancia	223
8) Procedimientos de emergencia asistidos por gemelo (EOP)	223
9) CBM de jet-fans/compuertas y bombeo de drenaje	223
10) Ciberseguridad y continuidad (IEC 62443 “proporcional”)	224
11) IST/Comisionado digital y transferencia a O&M.....	224
Consecuencias Previstas.....	224
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	225

Lecciones Aprendidas	226
----------------------------	-----

Caso práctico 6. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS." **Mantenimiento de presiones diferenciales y optimización energética en áreas críticas hospitalarias con gemelo digital y BMS.228**

Causa del Problema	228
Soluciones Propuestas.....	228
1) Gobierno de datos y semántica clínica-técnica común.....	228
2) Conectividad desacoplada y calidad temporal de datos.....	229
3) Refuerzo sensorio y verificación de bases	229
4) Plataforma de datos (TSDB) y cuadros operativos/forenses	229
5) Gemelo digital de presiones y flujos (modelo físico-datos)	229
6) FDD (detección y diagnóstico de fallos) orientado a seguridad.....	230
7) Supervisión de setpoints y consignas adaptativas.....	230
8) Optimización energética "sin martillo"	230
9) CBM (mantenimiento basado en condición) de UTAs/compuertas/filtros	230
10) Ciberseguridad y continuidad (IEC 62443 "proporcional")	231
11) IST/Comisionado digital y transferencia a O&M/Prevención	231
Consecuencias Previstas.....	231
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	231
Lecciones Aprendidas.....	233

Caso práctico 7. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS." **Optimización de una red de district cooling con gemelo digital hidráulico-térmico y SCADA multisede.235**

Causa del Problema	235
Soluciones Propuestas.....	235
1) Gobierno de datos y semántica hidráulico-térmica común.....	235
2) Conectividad desacoplada SCADA/ETS → plataforma de datos (OPC UA/MQTT, DMZ industrial)...	236
3) TSDB y cuadros de mando operativos/ejecutivos (kWh_el/MWh_frio, ΔT, fugas, TES).....	236
4) Gemelo digital hidráulico-térmico de planta + red + ETS (modelo híbrido)	236
5) FDD (detección/diagnóstico) para ΔT, fugas, bombas y intercambiadores.....	236
6) Secuenciación óptima de enfriadoras/bombas y ΔT manager	237
7) Optimización de TES (tanques) y free-cooling con horizonte horario (MPC supervisado)	237
8) Plan de M&V (IPMVP B/C) y facturación fiable en ETS	237
9) CBM (mantenimiento basado en condición) de bombas, válvulas y chillers.....	237
10) Ciberseguridad y continuidad (IEC 62443 "proporcional")	238
11) IST/Comisionado digital y transferencia a O&M/comercial	238
Consecuencias Previstas.....	238
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	238
Lecciones Aprendidas.....	240

Caso práctico 8. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS." **Gestión integral de terminal aeroportuaria con gemelo digital, previsión de ocupación y coordinación BMS/SCADA.....242**

Causa del Problema	242
Soluciones Propuestas.....	242
1) Gobierno de datos transversal y semántica común BMS/SCADA/AODB	242
2) Conectividad desacoplada con DMZ industrial y bus de eventos OT/IT	243
3) Plataforma de series temporales y cuadros unificados (operativos/ejecutivos)	243
4) Gemelo digital operativo con previsión de ocupación (HVAC + IAQ + afluencias)	243
5) FDD multicapas (HVAC, eléctricos, verticales) con integración CMMS	243
6) Optimización tarifaria y de picos (peak shaving) coordinada con el gemelo.....	244
7) Procedimientos de emergencia asistidos por gemelo (humo y EVAC)	244

8) CBM en equipos auxiliares y HVAC	244
9) Ciberseguridad y continuidad (IEC 62443 "proporcional")	244
10) IST/Comisionado digital y formación por turnos	245
Consecuencias Previstas	245
Resultados de las Medidas Adoptadas	245
Lecciones Aprendidas	247
Caso práctico 9. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS."	
Orquestación de una microrred industrial con FV+BESS+grupos, EMS y SCADA mediante gemelo digital operativo.	249
Causa del Problema	249
Soluciones Propuestas	249
1) Gobierno de datos y semántica energética común (OT/IT/Finanzas)	249
2) Conectividad desacoplada y bus de eventos OT/IT (SCADA/BMS→plataforma)	249
3) TSDB y cuadros de mando (operativos, M&V y ejecutivos)	250
4) Gemelo digital operativo de la microrred (flujo de potencia + térmico ligero)	250
5) FDD energético (inversores, BESS, PQ, contadores)	250
6) MPC (control predictivo) para despacho óptimo FV-BESS-red	251
7) Peak shaving y redimensionamiento de potencia contratada	251
8) Respuesta a precios y mercados de flexibilidad (cuando aplicable)	251
9) Estrategia de mantenimiento (CBM) para BESS/FV y apartamenta	251
10) Ciberseguridad y acceso remoto seguro (IEC 62443 "proporcional")	251
11) IST/Comisionado digital y traspaso a O&M/Finanzas	252
Consecuencias Previstas	252
Resultados de las Medidas Adoptadas	252
Lecciones Aprendidas	253
Caso práctico 10. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS."	
Coordinación de tracción, ventilación y evacuación en una línea de metro mediante gemelo digital interoperable.	255
Causa del Problema	255
Soluciones Propuestas	255
1) Gobierno de datos y semántica transversal (tracción-auxiliares-BMS-ATS)	255
2) Conectividad desacoplada y DMZ industrial	256
3) TSDB y cuadros operativos/ejecutivos con "línea de tiempo unificada"	256
4) Gemelo digital operativo (energético-flujo de aire-afluencia)	256
5) FDD multicapas con integración CMMS	257
6) Ventilación por demanda (DVC) tunel-estación-andén ligada a afluencia	257
7) HVAC/iluminación adaptativas por afluencia	257
8) Gestión de picos y absorción de regenerativa	257
9) Procedimientos de emergencia asistidos por gemelo (EOP)	257
10) CBM en ventilación y transporte vertical	258
11) Ciberseguridad y continuidad (IEC 62443 "proporcional")	258
12) IST/Comisionado digital y formación por turnos	258
Consecuencias Previstas	258
Resultados de las Medidas Adoptadas	259
Lecciones Aprendidas	260
Caso práctico 11. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS."	
Orquestación energética y operativa en terminal portuaria con reefers, grúas STS/RTG y OPS (On-shore Power Supply)	262
Causa del Problema	262
Soluciones Propuestas	262
1) Gobierno de datos y semántica transversal (SCADA-RMS-TOS-BMS)	262

2) Conectividad desacoplada y DMZ industrial (OPC UA→MQTT)	262
3) TSDB unificada y cuadros operativos/ejecutivos	263
4) Gemelo digital operativo (eléctrico-térmico-operativo)	263
5) FDD (detección/diagnóstico) en STS/RTG/reefers/OPS	263
6) Orquestación de defrost y setpoints en reefers	263
7) Coordinación STS/RTG/OPS con “guardarrailes”	264
8) Iluminación y HVAC adaptativos (BMS) por ocupación/turno	264
9) M&V, KPI de negocio y reporting ESG	264
10) Ciberseguridad y continuidad (IEC 62443 “proporcional”)	264
11) IST/Comisionado digital y transferencia a operación	264
Consecuencias Previstas	265
Resultados de las Medidas Adoptadas	265
Lecciones Aprendidas	266

Caso práctico 12. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS."

Optimización de AEP y O&M predictivo en un parque eólico mediante gemelo aerodinámico y

SCADA IEC 61400-25.268

Causa del Problema	268
Soluciones Propuestas	268
1) Gobierno de datos y semántica IEC 61400-25 + catálogo de activos	268
2) Conectividad desacoplada y DMZ industrial (IEC 61400-25/OPC UA → MQTT)	269
3) TSDB e indicadores unificados (operación, integridad y red)	269
4) Gemelo digital aerodinámico-operativo (parque, estela y red)	269
5) FDD multicapas (aerogeneradores, CMS y subestación)	269
6) Alineación de yaw y corrección de offset (campana y lazos)	270
7) Gestión de estelas segura (wake steering) en ventanas	270
8) Optimización de curtailments por red/ruido (MPC ligero)	270
9) Programa CBM (multiplicadora, rodamiento principal, generador y pitch)	270
10) M&V de AEP y disponibilidad (IEC 61400-12/26)	270
11) Ciberseguridad y continuidad (IEC 62443 “proporcional”)	271
12) IST/Comisionado digital y transferencia a operación	271
Consecuencias Previstas	271
Resultados de las Medidas Adoptadas	271
Lecciones Aprendidas	273

Caso práctico 13. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS."

Banco de pruebas virtual (SIL/HIL) y co-simulación FMI/SSP para validar control avanzado de HVAC y microred en un campus multisede.275

Causa del Problema	275
Soluciones Propuestas	275
1) Arquitectura del gemelo de simulación y alcance funcional	275
2) Co-simulación FMI/SSP y orquestación temporal	276
3) Banco SIL/HIL con PLCs virtuales y SCADA/BMS en sandbox	276
4) Generación sistemática de escenarios y stress testing	276
5) Validación y calibración de modelos (M&V del modelo)	276
6) Pruebas de regresión y gobierno de versiones (ModelOps)	276
7) “Security-by-design” del sandbox y pruebas de ciberresiliencia	277
8) KPIs de validación, “gates” de despliegue y comité de aceptación	277
9) Integración con DCIM/BMS para mapeo de activos y telemetría fiable	277
10) Transferencia a operación y formación por turnos	277
Consecuencias Previstas	278
Resultados de las Medidas Adoptadas	278
Lecciones Aprendidas	279

Caso práctico 14. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS." **Optimización multiobjetivo de cooling en centro de datos Tier III con gemelo digital, MPC y** **aprendizaje por refuerzo seguro.....281**

Causa del Problema	281
Soluciones Propuestas.....	281
1) Gobierno de datos y semántica DCIM–BMS–SCADA–IT	281
2) Conectividad desacoplada y DMZ industrial.....	281
3) TSDB + cuadros de mando (operativos/ejecutivos/M&V)	282
4) Gemelo digital termo-hidráulico y eléctrico del data center	282
5) FDD (detección y diagnóstico) para CRAH/agua/torres/DCIM	282
6) Control predictivo (MPC) de planta de agua + ventiladores/torres	282
7) Aprendizaje por refuerzo seguro (RL) para ajuste fino de setpoints de CRAH	283
8) Orquestación con TI (workload-aware cooling).....	283
9) M&V (IPMVP B/C) y reporting de PUE/ahorros	283
10) Ciberseguridad y continuidad (IEC 62443 “proporcional”)	283
11) IST/Comisionado digital y formación por turnos	284
Consecuencias Previstas.....	284
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	284
Lecciones Aprendidas.....	285

Caso práctico 15. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS." **DERMS con gemelo digital para optimizar autoconsumo, picos y flexibilidad en una red multisede de** **edificios con FV, baterías y recarga de VE.287**

Causa del Problema	287
Soluciones Propuestas.....	287
1) Gobierno de datos y semántica transversal (BMS/SCADA/DER/OCPP/DCIM)	287
2) Conectividad desacoplada y DMZ por sede (OPC UA/BACnet/IEC 61850/OCPP → MQTT)	288
3) TSDB corporativa y cuadros de mando por sede y “fleet view”	288
4) Gemelo digital EMS/DERMS (sede y corporativo)	288
5) FDD (detección/diagnóstico) energético y de activos DER/VE/HVAC.....	288
6) Optimización tarifaria y orquestación FV–BESS–cargas (MPC con guardarraíles).....	289
7) Recarga VE inteligente (smart charging) y gestión de colas OCPP.....	289
8) Flexibilidad agregada y participación en programas (cuando aplicable)	289
9) Estrategia de resiliencia (modo isla) en sedes críticas	289
10) Sostenibilidad y reporting ESG (CSRD/GRI).....	289
11) Ciberseguridad y continuidad (IEC 62443 “proporcional”)	290
12) IST/Comisionado digital y formación por turnos	290
Consecuencias Previstas.....	290
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	291
Lecciones Aprendidas.....	292

Caso práctico 16. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS." **Programa ESG con gemelo digital para energía, agua, residuos y pasaporte de materiales en una** **cartera corporativa multisede.294**

Causa del Problema	294
Soluciones Propuestas.....	295
1) Gobierno de datos ESG y semántica transversal	295
2) Conectividad desacoplada OT/IT→plataforma ESG (DMZ industrial)	295
3) TSDB ESG, catálogo de factores y motor de cálculo de emisiones	295
4) Gemelo digital ESG (energía–agua–residuos–materiales).....	295
5) FDD y alertas para pérdidas, fugas y anomalías de consumo	296
6) Optimización energética y de agua (operación basada en datos)	296
7) Gestión de residuos y economía circular con incentivos	296

8) Pasaporte digital de materiales en reformas y deconstrucción	296
9) PPAs/autoconsumo y market-based (S2)	296
10) Cuadros de mando ESG (ejecutivo, técnico y auditoría).....	297
11) Ciberseguridad y continuidad (IEC 62443 “proporcional”).....	297
12) IST/Comisionado digital y formación	297
Consecuencias Previstas.....	297
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	298
Lecciones Aprendidas.....	299

Caso práctico 17. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS."

Centro de control 24x7 multisede con NOC/SOC integrados y prácticas SRE para operación OT/IT.301

Causa del Problema	301
Soluciones Propuestas.....	301
1) Modelo operativo 24x7 y roles con segregación OT/IT	301
2) Centro de control dual y geo-redundante (activo/activo).....	302
3) Observabilidad integral OT/IT y “línea de tiempo unificada”	302
4) Catálogo de alarmas, correlación y supresiones inteligentes (AIOps/FDD).....	302
5) Prácticas SRE: SLO, error budgets y gestión de incidencias	302
6) Playbooks y runbooks accesibles desde el gemelo	302
7) Gestión de cambios y CAB OT/IT	303
8) Acceso remoto seguro y observabilidad de sesiones	303
9) Integración NOC↔SOC (detección y respuesta OT/IT).....	303
10) Ensayos de resiliencia y war-rooms coordinados	303
11) Métricas, cuadros y reporting.....	303
12) Formación, acreditación y culturización	303
13) Coste y sostenibilidad de la plataforma (FinOps/CostOps)	303
Consecuencias Previstas.....	304
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	304
Lecciones Aprendidas.....	305

Caso práctico 18. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS."

Modelo de contratación, licencias y retorno económico para desplegar un gemelo digital OT/IT en una red hospitalaria multiterritorio.....307

Causa del Problema	307
Soluciones Propuestas.....	307
1) Estructura contractual por “lotes funcionales” y “servicios”	307
2) Modelo de licencias “por producto de datos” + “nodos de procesamiento”, con techo y escalones.....	308
3) Estructura económico-financiera CAPEX/OPEX y calendario de pagos	308
4) Cláusula de desempeño con pagos variables (gainshare) y M&V	308
5) SLA/OLA técnicos y SRE (fiabilidad y tiempos).....	308
6) Ciberseguridad contractual (IEC 62443 “proporcional”) y continuidad	309
7) Plan de riesgos, garantías y seguros	309
8) Gobernanza económico-técnica y CAB	309
9) Modelo de licencias “edge + core” con redundancia	309
10) Plantillas contractuales reutilizables (pliegos internos).....	309
Consecuencias Previstas.....	310
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	310
Lecciones Aprendidas.....	311

Caso práctico 19. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS."

Programa integral de cumplimiento IEC 62443/ISO 27001 y RGPD apoyado en gemelo digital para un operador aeroportuario multirregional.313

Causa del Problema	313
Soluciones Propuestas.....	314

1) Mapa regulatorio, alcance y “controles mínimos razonables”	314
2) Gobierno y roles (CISO, OT Lead, DPO, Data Owner y Comité de Arquitectura)	314
3) Inventario único de activos y tratamientos anclado al gemelo	314
4) Segmentación y DMZ industrial según Purdue + listas de flujo	314
5) Identidades, acceso remoto y secretos	314
6) Gestión de parches/vulnerabilidades OT e IT	315
7) Trazabilidad y evidencias ALCOA+ (línea de tiempo unificada)	315
8) Privacidad por diseño: DPIA, minimización y retención	315
9) Contratación y requisitos de proveedores (seguridad por diseño)	315
10) Continuidad (DRP/BCP), copias inmutables y geo-redundancia	315
11) Formación, concienciación y drills coordinados NOC/SOC	316
12) M&V del cumplimiento y reporting ejecutivo	316
Consecuencias Previstas	316
Resultados de las Medidas Adoptadas	316
Lecciones Aprendidas	319

Caso práctico 20. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS."

Estandarización de checklists de integración y control de calidad de datos en un despliegue

multisede.	321
Causa del Problema	321
Soluciones Propuestas	321
1) Marco corporativo de checklists y “gates” de calidad (QG0→QG4)	321
2) Inventario de fuentes y tags (Checklist 20.1)	322
3) Calidad y validación de datos (Checklist 20.2)	322
4) Semántica y mapeos (Checklist 20.3)	322
5) Historian/TSDB y retención (Checklist 20.4)	322
6) APIs y eventos (Checklist 20.5)	322
7) Gobernanza y acceso (Checklist 20.6)	322
8) Automatización de checklists (linters, CLI y plantillas)	323
9) Banco de pruebas de integración (IST) con datos sintéticos	323
10) M&V de calidad de datos y cuadro de mando	323
11) Formación y certificación de integradores	323
12) Ciberseguridad transversal en el dato	323
Consecuencias Previstas	323
Resultados de las Medidas Adoptadas	324
Lecciones Aprendidas	325

Caso práctico 21. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS."

Implantación de formularios de arquitectura y ciberseguridad OT/IT como “contrato de integración” en un consorcio multisede.

327
Causa del Problema
Soluciones Propuestas
1) Marco de formularios y “gates” de aceptación (QG-Sec0→QG-Sec4)
2) Topología y segmentación (Formulario 21.1)
3) Acceso remoto y bastionado (Formulario 21.2)
4) Gestión de identidades y secretos (Formulario 21.3)
5) Parches y vulnerabilidades (Formulario 21.4)
6) Continuidad y copias inmutables (Formulario 21.5)
7) Conformidad y auditoría (Formulario 21.6)
8) Runbooks y playbooks embebidos en el gemelo
9) Automatización de formularios y verificación (tooling)
10) Gobierno y CAB OT/IT conjunto
Consecuencias Previstas
330

Resultados de las Medidas Adoptadas.....	330
Lecciones Aprendidas.....	331

Caso práctico 22. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS."

Estándares de commissioning digital y pruebas de integraciones en un programa multisede. ...333

Causa del Problema.....	333
Soluciones Propuestas.....	333
1) Plan de pruebas y criterios de aceptación unificados (FAT/SAT/SIT/IST)	333
2) Planillas de señales y alarmas (matriz de trazabilidad y C&E)	334
3) Pruebas de contrato de APIs y eventos (compatibilidad hacia atrás).....	334
4) Ensayos de rendimiento bajo carga (caudal, burst y stress).....	334
5) Resiliencia, failover y recuperación de colas (DR/BCP).....	334
6) Cibercontroles de integración (IEC 62443 "proporcionales").....	335
7) Handover digital y documentación operativa (SOP/SLA/SLO)	335
8) Banco de pruebas y emuladores (OPC UA/BACnet/Modbus/IEC 104)	335
9) Gobernanza: CAB de commissioning y "gates" firmados	335
10) Métricas de calidad y cuadro de mando de commissioning.....	335
Consecuencias Previstas.....	336
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	336
Lecciones Aprendidas.....	337

Caso práctico 23. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS."

Plantillas APM/RCM/CBM y operación basada en datos para una utility de agua multisede (bombas, soplantes y centrifugadoras).339

Causa del Problema.....	339
Soluciones Propuestas.....	340
1) Matriz de criticidad y estrategia RCM por familia de activos	340
2) Sensórica y adquisición de datos (vibración, térmica, acústica, eléctrica y proceso)	340
3) Calidad y gobierno del dato de condición.....	340
4) Gemelo operativo enlazado a SCADA/BMS/DCIM y contexto de proceso	340
5) Analítica avanzada e IA (detección, diagnóstico y prognosis/RUL).....	341
6) Workflows EAM/CMMS: de alerta a OT con SLA y repuestos	341
7) Programa de repuestos y obsolescencia basado en criticidad y RUL	341
8) Optimización energética operativa (BEP y ensuciamiento)	341
9) Ciberseguridad y continuidad (IEC 62443 proporcional)	342
10) IST/Comisionado digital y formación por turnos	342
Consecuencias Previstas.....	342
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	343
Lecciones Aprendidas.....	344

Caso práctico 24. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS."

SLA/OLA, cuadros de mando y reporting ejecutivo en un programa multisede con gemelo digital.346

Causa del Problema.....	346
Soluciones Propuestas.....	346
1) Catálogo de servicios y definición de SLIs "medibles por diseño"	346
2) Diseño de SLA/OLA con jerarquía, exclusiones y error budgets	347
3) Arquitectura de datos para SLIs (telemetría→SLO/SLA)	347
4) Cuadros de mando por niveles (operativo, táctico y ejecutivo)	347
5) Motor de reporting y "paquete de servicio" mensual	347
6) Comité de Servicio y cadencia (mensual/trimestral) con actas vinculantes	348
7) Penalizaciones e incentivos vinculados al gemelo y al M&V	348
8) Librería de KPI económico-operativos por servicio.....	348
9) Automatización de alertado por consumo de error budget y desviaciones	348
10) Formación y "tarjetas de KPI" por rol	348



Consecuencias Previstas.....	349
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	349
Lecciones Aprendidas.....	350

Caso práctico 25. "GEMELO DIGITAL E INTEGRACIÓN SCADA/BMS/DCIM EN INFRAESTRUCTURAS."
RFP multinacional y business case para seleccionar plataforma de gemelo digital OT/IT con
integración SCADA/BMS/DCIM, modelo económico escalable y garantías de interoperabilidad.352

Causa del Problema	352
Soluciones Propuestas.....	352
1) Pliego funcional y técnico (alcance del gemelo digital)	352
2) Criterios de interoperabilidad y semántica (OT/IT)	353
3) Arquitectura de referencia y límites (edge–DMZ–core)	353
4) Gobierno del dato, TSDB y ALCOA+	353
5) Ciberseguridad e identidades (IEC 62443 “proporcional”)	353
6) Modelo de licencias y techos de precio	353
7) POC/piloto medible (criterios de aceptación)	354
8) Matriz de evaluación y ponderaciones	354
9) Condiciones de contrato y gobernanza	354
10) Plan de despliegue por oleadas y riesgo	354
11) Cumplimiento regulatorio España/LatAm y privacidad	354
12) Business case y sensibilidad (VAN/TIR/pago por desempeño)	355
Consecuencias Previstas.....	355
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	355
Lecciones Aprendidas.....	357

¿QUÉ APRENDERÁ?



- Comprender los fundamentos del Cx/IST y su relación con QA/QC, pruebas de rendimiento y garantía.
- Definir OPR/BOD y diseñar para el commissioning (DfCx) con trazabilidad a pruebas y evidencias.
- Estructurar la gestión documental y la trazabilidad extremo a extremo en el CDE.
- Gestionar interfaces técnicas y aplicar el V-Model en verificación y validación.
- Planificar y ejecutar FAT/IFAT con criterios de aceptación, simuladores y cadena de custodia.
- Planificar y ejecutar SAT/iSAT en campo con energización segura, pruebas funcionales y de rendimiento.
- Diseñar y conducir IST integrados, operaciones en prueba y aceptación integrada extremo a extremo.
- Incorporar criterios RAMS, safety case y continuidad de servicio en el plan de pruebas.
- Implantar ciberseguridad OT/IT en Cx/IST con segmentación, control de accesos y registros.
- Realizar el handover digital conforme a ISO 19650, generar COBie y cargar activos en EAM/GMAO.
- Organizar equipos, contratos y control económico del Cx/IST con KPIs, SLAs y buena gobernanza.



- Aplicar plantillas, checklists y casos sectoriales para acelerar la ejecución y asegurar resultados medibles.

Introducción.



Del plano a la aceptación: cómo convertir el Commissioning (Cx) y el IST en ventaja competitiva

En un entorno de obras de ingeniería cada vez más exigente —con penalizaciones por indisponibilidad, marcos regulatorios estrictos y presión por reducir el OPEX— el Commissioning (Cx) y el Integrated Systems Testing (IST) han pasado de ser un trámite a convertirse en el corazón de la fiabilidad. Sin embargo, muchos equipos técnicos siguen teniendo dificultades para traducir ese valor en argumentos claros ante promotores, operadores y comités de inversión. Esta guía nace para resolver esa brecha: aportar criterios técnicos sólidos y, al mismo tiempo, herramientas prácticas para comunicar resultados, justificar la inversión y acelerar la aceptación.

Esta guía práctica internacional ofrece un recorrido completo y accionable: desde los fundamentos del Cx/IST y el diseño para el commissioning (DfCx), hasta los protocolos FAT/IFAT, SAT/iSAT e IST; la calidad y la trazabilidad (QA/QC), la gestión de interfaces bajo V-Model, RAMS y ciberseguridad OT; el handover digital conforme a ISO 19650 con COBie y carga a EAM/GMAO; la economía del cierre y los KPIs de aceptación; los enfoques por sectores (transporte, proceso, energía, túneles); y una parte extensa de herramientas: plantillas, formularios y checklists listos para usar, además de casos reales que iluminan cada decisión crítica.

Como profesional del sector, encontrarás aquí una palanca inmediata para mejorar tu estrategia y tu ejecución. Podrás articular una propuesta de valor diferencial basándote en riesgo, disponibilidad y coste total de propiedad; elaborar argumentos técnicos que se entienden en dirección y en obra; construir cuadros de mando con KPIs medibles por diseño; y presentar evidencias que acortan plazos de firma. Ganarás precisión en la preparación de pruebas, solidez en la documentación de resultados, y claridad para defender importes, plazos y garantías ante cualquier auditoría o comité.

Invertir en esta guía es invertir en ventajas tangibles: licitaciones mejor puntuadas, menos reclamaciones, menor tiempo de puesta en servicio, y mayor



confianza de promotores y operadores. También en beneficios intangibles: reputación técnica, liderazgo de tu equipo y capacidad de estandarizar buenas prácticas replicables en toda tu cartera de proyectos.



Si buscas una referencia de cabecera que una rigor técnico y aplicabilidad inmediata, esta es tu guía. Adquiérela, incorpórala a tu metodología y convierte el Cx/IST en el eje de tu propuesta de valor: más disponibilidad, más seguridad y mejores resultados económicos.



La excelencia no es un accidente; es el resultado de estar actualizado, medir lo que importa y comunicarlo con precisión. Da el paso y conviértete en el profesional que eleva el listón de la gestión y la operación en cada proyecto.