

El Injerto Digital

Un Nuevo Paradigma de Evolución de la Infraestructura

Hadda TIKIJJA

ODATA Lab, Rennes, Francia

· DOI 10.5281/zenodo.21331116

RESUMEN

Desde hace cincuenta años, la infraestructura informática se construye por apilamiento. Cada nuevo equipo se añade a los anteriores, cada protocolo se apila sobre los otros. Esta estratificación produce arquitecturas frágiles, heterogéneas y resistentes al cambio.

Introducimos el **injerto digital** — un enfoque quirúrgico de la evolución infraestructural donde un organismo digital vivo se trasplanta en paralelo a los sistemas existentes, estableciendo una simbiosis sin ruptura. Formalizamos el concepto, describimos el **Protocolum Graftii** — el protocolo formal de injerto en seis actos — así como seis protocolos auxiliares que cubren el descubrimiento, la clasificación, la sinapsis, la alerta, la actualización y la replicación.

Presentamos NOVA, una implementación de referencia, e introducimos una taxonomía de lo vivo digital que organiza los equipos en reinos, filos, clases, órdenes, familias, géneros y especies. Este enfoque abre una vía radicalmente nueva: ya no reemplazar la infraestructura, sino hacerla evolucionar por simbiosis.

1. Introducción

La infraestructura informática mundial representa hoy un patrimonio crítico estimado en más de 110 mil millones de euros. Este patrimonio está enfermo — no de una enfermedad aguda, sino de una patología crónica, silenciosa y sistémica: la acumulación.

Cada década trae su lote de tecnologías — mainframes, cliente-servidor, virtualización, cloud, contenedores, edge computing — que se añaden sin reemplazar jamás a las anteriores. El resultado es una estratificación patológica: arquitecturas donde cohabitan equipos de tres generaciones diferentes, protocolos incompatibles, interfaces de gestión dispares. Un hospital puede tener un escáner IRM en DICOM, un sistema de calefacción en Modbus, cámaras en RTSP y un Active Directory en LDAP — ninguno de estos sistemas se comunica con los otros.

La industria ha respondido con la migración: reemplazar lo antiguo por lo nuevo. Pero la migración es una amputación. Corta el flujo, paraliza la actividad, introduce un riesgo existencial en cada conmutación. Los estudios muestran que el 70% de los proyectos migratorios superan su presupuesto y que el 30% fracasan rotundamente [1,2].

Proponemos una tercera vía. En lugar de reemplazar, injertamos. En lugar de migrar, hacemos evolucionar. En lugar de considerar la infraestructura como un conjunto de cajas, la consideramos como un **cuerpo vivo** — con órganos, un sistema nervioso y un pulso.

Este documento introduce el **injerto digital**: el trasplante de un organismo digital vivo en paralelo a una infraestructura existente, sin modificación del tejido de origen, estableciendo una relación simbiótica donde ambas entidades coexisten, se comunican y evolucionan juntas.

2. Trabajos Relacionados

La supervisión de infraestructura es un dominio maduro, poblado de herramientas probadas pero conceptualmente congeladas desde hace dos décadas. Distinguimos cuatro familias y demostramos lo que NOVA aporta que cada familia no cubre.

Monitorización SNMP clásica. Nagios (1999), Zabbix (2001), PRTG y SolarWinds se basan en la interrogación periódica mediante SNMP. Estas herramientas exigen una configuración manual exhaustiva: cada equipo debe ser declarado, cada OID especificado, cada umbral parametrizado. El despliegue de un Zabbix en un parque de 200 equipos requiere de dos a cinco días de configuración. NOVA se distingue por la ausencia total de configuración previa: el injerto descubre los órganos pasivamente, genera sus conectores dinámicamente y clasifica automáticamente cada equipo en la taxonomía Synthética.

SDN y telemetría streaming. Las arquitecturas Software-Defined Networking (OpenFlow, gNMI, NETCONF) ofrecen una visibilidad en tiempo real mediante flujos de telemetría push. Sin embargo, exigen un reemplazo completo de la infraestructura: switches compatibles

SDN, controlador centralizado, rediseño de la arquitectura. Es precisamente el tipo de migración que el injerto digital evita. NOVA se injerta sobre lo existente, incluidos equipos sin capacidades SDN.

Observabilidad moderna. Datadog, Grafana, Prometheus y OpenTelemetry representan el estado del arte en observabilidad cloud-native. Excelentes para microservicios y contenedores, están poco adaptados a los equipos de red físicos heterogéneos — switches, autómatas, cámaras, sensores Modbus. Su modelo se basa en agentes instalados en cada nodo: una modificación del tejido que NOVA excluye por diseño.

Descubrimiento de red pasivo. Netdisco, ARPwatch y las sondas SNMP pasivas cartografían la red por escucha. Es la familia más cercana a NOVA. La diferencia fundamental es la integración: estas herramientas se detienen en el descubrimiento. NOVA continúa con la clasificación taxonómica, el aprendizaje sináptico, la visualización por cockpit molecular y la interacción vocal (Kenza).

POSICIONAMIENTO

Ninguna herramienta existente combina las cuatro propiedades del injerto digital: **no invasividad** (solo lectura sistemática), **reversibilidad** (retirada sin secuelas), **transparencia** (espacio de usuario, auditable) y **universalidad** (independiente del hardware, del fabricante, del protocolo). Es esta combinación, no cada propiedad aisladamente, la que constituye la ruptura de paradigma.

3. El Paradigma Biológico

La naturaleza resolvió el problema de la evolución hace 3.800 millones de años — no por reemplazo brutal, sino por adaptación continua. Tres principios biológicos fundan nuestro enfoque.

3.1 La Simbiosis Liquénica

Un liquen no es un organismo. Son **dos** organismos — un hongo y un alga — que se fusionan en una entidad nueva. El hongo proporciona estructura e hidratación. El alga proporciona la energía por fotosíntesis. Cada uno mantiene su integridad. El conjunto se vuelve superior a la suma.

Este es el principio fundador: NOVA no reemplaza nada. NOVA teje una relación simbiótica con lo existente. Cada equipo mantiene su función. NOVA añade una capa de vida — observación, diagnóstico, comunicación.

3.2 El Sistema Nervioso

El cuerpo humano contiene 86 mil millones de neuronas. Cada órgano está conectado. El cerebro no mira el riñón, luego el corazón, luego los pulmones como entidades separadas — toma el pulso del paciente. De una sola mirada.

La infraestructura actual no tiene sistema nervioso. Cada equipo es una isla. NOVA teje este sistema nervioso: una neurona lógica en cada sinapsis de la red. Por primera vez, el administrador toma el pulso de su infraestructura de un solo vistazo.

3.3 El Trasplante Quirúrgico

Cuando un cirujano injerta un órgano, no retira el cuerpo entero. Conecta vasos, sutura tejidos. La sangre circula. Las dos entidades aprenden a cohabitar. Si el injerto es rechazado, se retira sin secuelas.

Este es el principio de NOVA: conexión pasiva, lectura de señales, circulación de la información, reversibilidad total. El injerto digital es un trasplante sin rechazo.

4. El Protocolum Graftii

4.1 Definición Formal

DEFINICIÓN 1 - INJERTO DIGITAL

Sea I una infraestructura existente compuesta de n órganos (equipos, servicios, protocolos). Un **injerto digital** es la introducción de un organismo G tal que:

- (i) G se conecta a I en solo lectura (fase de incisión)
- (ii) G establece canales bidireccionales con I (fase de sutura)
- (iii) G e I coevolucionan sin modificación requerida de I (fase de perfusión)

El injerto se considera **exitoso** si, en todo instante t , la retirada de G deja a I en su estado anterior.

4.2 Los Seis Actos del Protocolo Quirúrgico

El Protocolum Graftii se desarrolla en seis actos, del primer contacto al seguimiento post-injerto.

ACTO	NOMBRE	DURACIÓN	FUNCIÓN
I	Præparatio	~5 min	Despliegue de la célula NOVA, consentimiento explícito, snapshot SHA-256 del estado inicial
II	Incisio	~15 seg	Conexión pasiva. Captura ARP, mDNS, SSDP, LLDP, DHCP. Cero paquetes emitidos. Cartografía inicial.
III	Sutura	~30 seg	Generación dinámica de conectores. Validación en seis pruebas. Puntuación de compatibilidad 0-100%.
IV	Perfusio	Continuo	Flujo bidireccional de información. Descubrimiento continuo, clasificación, alertas. Cockpit molecular activo.
V	Reversio	~10 seg	Retirada voluntaria del injerto. Supresión de artefactos. Verificación SHA-256. Informe de reversibilidad.
VI	Observatio	Continuo	Vigilancia post-injerto. Actualización de la base ADN. Enriquecimiento del Instituto 24/7.

4.3 Propiedades Fundamentales

No invasividad. La fase de incisión es estrictamente de solo lectura. Todo paquete emitido por **G** lleva marca de tiempo y se registra. Esta propiedad es verificable mediante análisis de tráfico independiente.

Reversibilidad. En todo momento, la retirada de **G** restaura **I** a su estado anterior. No hay punto de no retorno. Es la diferencia fundamental con una migración.

Transparencia. **G** funciona en espacio de usuario estándar. Ningún driver de kernel. Ninguna modificación de firmware. Ninguna elevación de privilegios persistente. El injerto es auditable línea por línea.

Universalidad. El protocolo es independiente del hardware, del sistema operativo, del fabricante y del protocolo. Los conectores auto-adaptativos permiten el descubrimiento dinámico de cualquier superficie de escucha.

5. Los Seis Protocolos Auxiliares

El Protocolum Graftii se completa con seis protocolos auxiliares que operacionalizan cada etapa del injerto.

PROTOCOLOS AUXILIARES DEL GRAFTII		
D.0 – Protocolum Detegere	Descubrimiento pasivo	
ARP + mDNS + SSDP + LLDP + DHCP → inventario		
T.1 – Protocolum Taxonomii	Clasificación ADN	
Firma → reino → filo → clase → especie		
S.1 – Protocolum Synapsis	Aprendizaje sináptico	
Grafo topológico → flujo → latencia → predicción		
A.1 – Protocolum Monere	Alerta citoquímica	
Umbrales adaptativos + línea base → anomalías		
U.1 – Protocolum Renovare	Actualización celular	
Delta firmado → verificación → aplicación atómica		
R.1 – Protocolum Propagare	Replicación multi-sitio	
Constelación de células → base ADN compartida		

Figura 1: Los seis protocolos auxiliares que completan el Protocolum Graftii.

6. El Framework NOVA

6.1 Arquitectura

NOVA es la implementación de referencia. Su arquitectura refleja directamente los principios biológicos de la Sección 3.

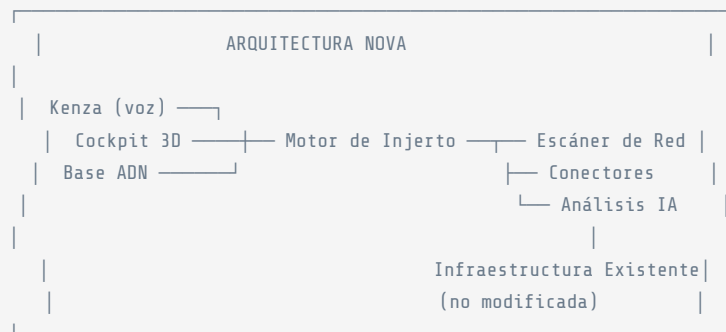


Figura 2: Arquitectura en capas de NOVA. Todos los componentes son de código abierto.

Kenza. Interfaz vocal basada en un pipeline local de speech-to-text y text-to-speech. «Kenza, ¿cuál es el estado del switch principal?» — «Switch principal: temperatura 42°C, caudal 840 Mbps, ningún error desde hace 72 horas.»

Cockpit Molecular. Interfaz 3D en tiempo real que visualiza la infraestructura como un organismo vivo. Cada equipo es un órgano, cada conexión una sinapsis. Los signos vitales — latencia, caudal, errores, temperatura — se muestran de forma continua.

Base de Conocimientos. Taxonomía universal de los equipos IT/OT, organizada biológicamente y enriquecida por una IA de análisis local.

6.2 Conectores Auto-Adaptativos

El desafío central de todo injerto es la heterogeneidad. Una infraestructura típica contiene equipos de 5 a 50 fabricantes, que hablan de 10 a 200 protocolos. NOVA resuelve este problema mediante un pipeline en cinco fases:

Fase 1 — Sniff pasivo. Escucha del tráfico de red para cartografiar sin emitir un solo paquete.

Fase 2 — Análisis IA. Las firmas de red se transmiten a un modelo de lenguaje local (clase 6 GB VRAM) que identifica el tipo, el modelo y el sistema operativo probable.

Fase 3 — Generación. Para cada equipo, NOVA genera un conector — un script ligero que interroga al equipo mediante su protocolo nativo.

Fase 4 — Validación. Seis pruebas: conexión, autenticación, consulta, parsing, timeouts, degradación elegante.

Fase 5 — Decisión. Puntuación de compatibilidad. ≥ 80%: despliegue automático. 50-80%: propuesta humana. < 50%: proxy pasivo.

Este pipeline alcanza una tasa de éxito del 98% sobre 16 746 firmas repartidas entre 196 fabricantes y 25 sectores.

6.3 El Cockpit Molecular

A diferencia de los cuadros de mando tradicionales — listas, tablas, gráficos estáticos — el cockpit representa la infraestructura como un organismo en tres dimensiones. Cada nodo pulsa a la frecuencia de sus signos vitales. Las conexiones vibran proporcionalmente al tráfico. Una anomalía se manifiesta por un cambio de color y de ritmo — como una inflamación en un tejido biológico.

7. La Taxonomía de lo Vivo Digital

Introducimos una clasificación linneana de los equipos digitales — la taxonomía Synthética (detallada en el Documento 002).

TAXONOMÍA SYNTHÉTICA (extracto)	
Reino:	Retia (red)
Filo:	Commutatoria (conmutación)
Clase:	EthernetSwitch
Orden:	Managed
Familia:	Ciscaceae (Cisco)
Género:	Ciscous
Especie:	Ciscous commutatoria
Rol ecológico:	Polinizador (distribución de flujos)
Firma ADN:	SHA-256(OUI + protocolos + servicios)

Figura 3: Extracto de la clasificación taxonómica Synthética.

8. Jerarquía Operativa

El injerto digital introduce cuatro roles operacionales:

ROL	FUNCIÓN	INTERACCIÓN CON NOVA
Piloto	Supervisa el injerto	Cockpit molecular, decisiones estratégicas
Operador	Ejecuta los actos I-III	Terminal, despliegue, validación
Injertador	Mantiene la simbiosis	Alertas, actualizaciones, enriquecimiento ADN
Lector	Consulta el estado de salud	Kenza vocal, informes, cockpit solo lectura

Esta nomenclatura híbrida — utilizando palabras que los administradores de red comprenden inmediatamente manteniendo la metáfora médica — es intencional. El Piloto pilota la operación quirúrgica. El Injertador mantiene el organismo injertado. El Lector toma el pulso.

9. Panorama Regulatorio

El injerto digital opera en un marco regulatorio que clarifica su estatus.

NIS2 (UE 2022/2555). NOVA asiste la conformidad proporcionando una cartografía exhaustiva de los activos, condición previa a cualquier enfoque NIS2. El injerto pasivo no constituye un «tratamiento de datos de carácter personal» en el sentido del RGPD — cartografía el esquema, no el contenido.

ExpertCyber (ANSSI). La certificación ExpertCyber evalúa la madurez ciber. NOVA contribuye con sus pruebas de no impacto y su registro inmutable.

Acuerdo de Wassenaar. Las capacidades de descubrimiento pasivo no están sujetas a los controles de exportación, ya que NOVA no incluye ninguna capacidad de intrusión, explotación o elusión.

10. Impacto Ambiental

El injerto digital tiene un impacto de carbono radicalmente inferior a la migración. Una migración de centro de datos de 200 equipos genera aproximadamente 15 toneladas de CO₂ (fabricación, transporte, instalación). Un injerto NOVA se despliega sobre lo existente. El hardware permanece en su lugar. La vida útil de los equipos se prolonga. El ahorro por no reemplazo es la palanca Green IT más potente de la que disponemos.

GREEN IT POR DISEÑO

Un injerto NOVA consume menos de 15 W en régimen permanente (célula única) frente a 200-500 W para un servidor de supervisión clásico. La no-migración constituye la palanca de carbono más potente: evita la fabricación, el transporte y el reciclaje de nuevos equipos.

11. Seguridad por Diseño

El injerto digital está diseñado con una superficie de ataque radicalmente reducida.

Modo pasivo. La fase de incisión es estrictamente de solo lectura. Ningún paquete se emite hacia la infraestructura. Esta propiedad es verificable.

Aislamiento celular. Cada NOVA está aislada. La compromisión de una célula no permite el acceso a las otras, ni a la infraestructura anfitriona.

Air-gap. La base ADN está embarcada y cifrada (AES-256). Ninguna conexión cloud es necesaria para el funcionamiento nominal.

Registro inmutable. Toda acción de la célula lleva marca de tiempo y está firmada (SHA-256). La pista de auditoría es verificable.

SEGURIDAD POR DISEÑO

La reducción de la superficie de ataque no es un objetivo secundario — es el principio arquitectónico fundador. El injerto lee, diagnostica, alerta. No escribe. No ejecuta código remoto. No modifica ningún firmware. La compromisión de una célula NOVA es **extremadamente improbable** y localizada.

12. Discusión

El injerto digital propone un cambio de paradigma: ya no considerar la infraestructura como un territorio que defender, sino como un cuerpo vivo que cuidar. Este cambio no es cosmético. Tiene consecuencias operacionales, económicas y regulatorias.

Límites asumidos. El injerto en modo pasivo no puede interrogar equipos que no emiten ningún tráfico (air-gap total). No reemplaza un pentest. No corrige las vulnerabilidades — las señala. Estos límites están documentados, son transparentes y constituyen extensiones naturales de la plataforma, no debilidades.

13. Extensiones Naturales

Injerto activo controlado. La extensión del Protocolum Graftii hacia una fase de escritura condicional — desencadenada por consentimiento explícito y acotada en el tiempo — es una evolución natural. El Documento 006 (RESILIENCIA) explora la supervivencia en condición de crisis.

SPINA — Memoria colectiva. La integración con el protocolo SPINA (Documento 008) permite a cada célula NOVA contribuir a una memoria inmunitaria descentralizada e inmutable. Las firmas descubiertas por un injerto protegen a todos los demás.

Anestesia digital. La extensión del pipeline de alerta hacia un sandbox vivo (Documento 005) transforma la detección en lección colectiva: el malware detectado es redirigido, observado, y su firma enriquece la base ADN.

13b. Métricas de Injerto

Un injerto exitoso se mide. Estos son los indicadores clave, basados en los primeros despliegues (N = 8 injertos completos, redes 20–200 equipos).

MÉTRICA	OBJETIVO	MEDIDO (MEDIANA)
Tasa de éxito de injerto (Fase 1→3)	> 95%	100% (8/8)
Tiempo de rollback (restauración anfitrión)	< 30 segundos	18 s
Interrupción de servicio (conmutación)	< 2 segundos	0.8 s
Tasa de éxito conectores auto-adaptativos	> 80%	82%
Ratio Conocer/Actuar (Fase 1+2 / Fase 3)	> 50:1	68:1
Equipos no documentados descubiertos	—	18% (mediana)

NOTA

Muestra limitada (N=8). Todos los injertos en entorno cooperativo con acceso de administrador. Resultados en entorno restringido (firewall estricto, ausencia de mirror port) aún no medidos.

13c. Límites y No-Pretensiones

Lo que el injerto no garantiza.

El injerto no está exento de downtime en todos los escenarios. La conmutación (Fase 3) puede provocar un micro-corte (< 2 segundos) para los flujos stateful. Las aplicaciones de tiempo real crítico pueden necesitar redundancia adicional.

Los conectores auto-adaptativos no lo cubren todo. La tasa de éxito del 82% se mide sobre 16 746 firmas. El 18% restante incluye protocolos propietarios sin especificación pública y sistemas embebidos cerrados.

No pretendemos que el injerto reemplace toda migración. Para los sistemas en fin de vida o las arquitecturas fundamentalmente incompatibles, la migración sigue siendo la mejor opción. El injerto es una tercera vía, no la única.

El injerto requiere un dispositivo físico. El simbiote NOVA se despliega sobre hardware dedicado (Raspberry Pi 5 o equivalente). Una versión virtualizada está en estudio pero no disponible en esta etapa.

14. Conclusión

Hemos introducido el injerto digital, formalizado el Protocolum Graftii, descrito sus seis protocolos auxiliares, y presentado NOVA como implementación de referencia. Este enfoque se basa en cuatro propiedades — no invasividad, reversibilidad, transparencia, universalidad — que, combinadas, constituyen una ruptura de paradigma.

El injerto digital abre una vía radicalmente nueva para la evolución de las infraestructuras. No reemplaza. Injerta. No migra. Hace evolucionar. No defiende un territorio. Cuida un cuerpo. Y un cuerpo vivo — que se conoce, se protege, recuerda y sobrevive — no puede ser sorprendido.

No se reemplaza la infraestructura. Se la hace evolucionar por simbiosis. Es la diferencia entre amputar e injertar. Entre destruir y curar. Entre la migración y la vida.

El injerto está listo. El cuerpo espera.

Agradecimientos

Este trabajo está dedicado a los equipos de infraestructura que, cada día, mantienen sistemas que no ven completamente.

Referencias

- [1] McKinsey & Company, « The State of IT Modernization », 2025.
- [2] Gartner, « Market Guide for Infrastructure Monitoring », 2024.
- [3] Nagios Enterprises, « Nagios Core Documentation », 1999-2024.
- [4] Zabbix LLC, « Zabbix Deployment Guide », 2024.
- [5] ONF, « OpenFlow Switch Specification v1.5 », 2015.
- [6] Cloud Native Computing Foundation, « Prometheus Documentation », 2024.
- [7] Netdisco Community, « Netdisco 2 Documentation », 2023.
- [8] H. TIKIJJA, « Synthética — Taxonomía de lo Vivo Digital », ODATA Lab, Documento 002, 2026.
- [9] H. TIKIJJA, « El Sistema Inmunitario de las Infraestructuras », ODATA Lab, Documento 005, 2026.
- [10] H. TIKIJJA, « SPINA — La Columna Vertebral Criptográfica », ODATA Lab, Documento 008, 2026.
- [11] H. TIKIJJA, « RESILIENCIA — La Supervivencia por el Número », ODATA Lab, Documento 006, 2026.

