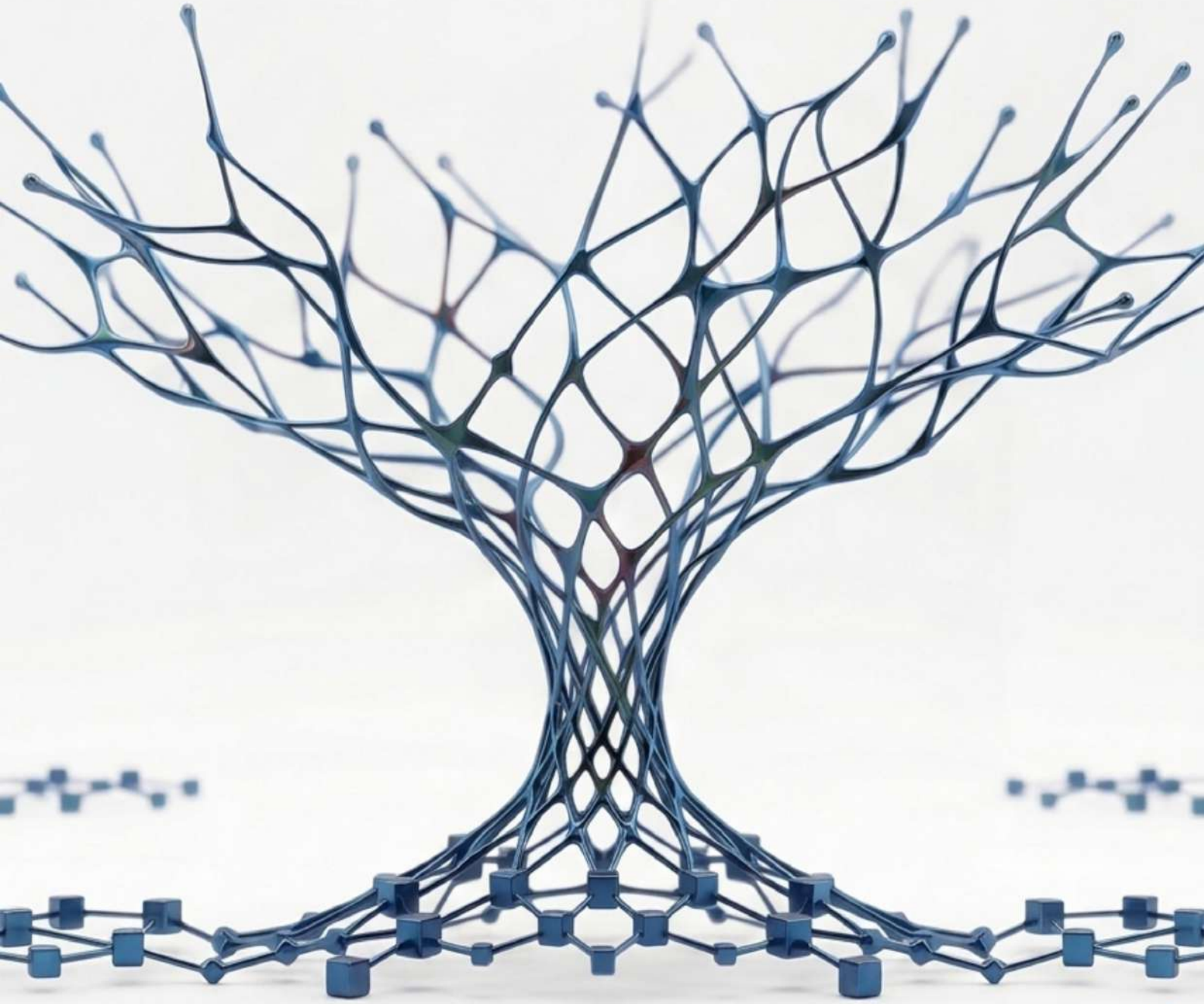
CIENCIA Y TECNOLOGÍA

CENDITEL

Tecnologías Libres

para el desarrollo estratégico de la nación



[2022 - 2030]

Tecnologías Libres para el desarrollo estratégico de la nación

Daniel Quintero
Santiago Roca
Aida Andrade
Yazmary Rondón
María Alejandra Rujano
María Eugenia Acosta
Pablo Sulbarán
Jesús Erazo

República Bolivariana de Venezuela
Ministerio del Poder Popular para Ciencia y Tecnología (MINCYT)
Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres
(CENDITEL)

Tecnologías Libres para el desarrollo estratégico de la nación

Presidente de CENDITEL
Juan Villegas
Directora de Investigación en Tecnologías Libres
María Alejandra Rujano
Editor
Jesús Erazo
Diseño de portada y secciones
Gabriel Martínez
Ilustración
Miguel Albornoz
Diagramación
Pablo Sulbarán
Jesús Erazo

Comité Científico Asesor

Dr. Miguel Palmera	Universidad de Los Andes, Venezuela
Dra. Miriam Muñoz	Universidad Politécnica Territorial del Estado Mérida Kléber Ramírez, Venezuela
MSc. Alejandro Mújica	Universidad de Los Andes, Venezuela
Dr. José García	Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Venezuela
Dr. Tanger Rivas	Universidad de Los Andes, Venezuela
MSc. Gerlyn Duarte	Universidad de Los Andes, Venezuela
Dra. María Alejandra Villasmil	Universidad de Los Andes, Venezuela
MSc. Domelys Sangronis	Universidad de Los Andes, Venezuela
Dr. José Angarita	Universidad de Los Andes, Venezuela
Dr. Daniel Ramírez	Universidad de Los Andes, Venezuela
Dr. Yunior Pérez	Universidad Nacional Autónoma de México, México
MSc. Libardo Zerpa	Universidad de Los Andes, Venezuela
MSc. Carlos Jaimes	Universidad de Los Andes, Venezuela
Dr. John Ferreira	Universidad de Los Andes, Venezuela

Datos para la catalogación bibliográfica

Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL)
Tecnologías Libres para el desarrollo estratégico de la nación
Colección: Oscar Varsavsky
Serie: Pensamiento crítico sobre la contemporaneidad tecnológica
Noviembre 2026, Primera Edición
Depósito Legal: ME2026000197
ISBN: 978-980-7154-26-0
Sitio oficial: https://convite.cenditel.gob.ve/libros/

Los contenidos de esta publicación expresan el punto de vista personal de los autores, quienes son los únicos responsables de sus escritos y son divulgados con el propósito de generar el debate en torno a las Tecnologías Libres. De ningún modo debe entenderse que los mismos representan necesariamente la política oficial del Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL) ni del Ministerio del Poder Popular para Ciencia y Tecnología (MINCYT).

Tecnologías Libres para el desarrollo estratégico de la nación

Derecho de Autor 2026 de: Daniel Quintero, Santiago Roca, Aida Andrade, Yazmary Rondón, María Alejandra Rujano, María Eugenia Acosta, Pablo Sulbarán y Jesús Erazo



Todos los documentos publicados en el libro *Tecnologías Libres para el desarrollo estratégico de la nación*, se distribuyen bajo la Licencia Creative Commons Atribución – No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0). Usted puede copiar, distribuir y comunicar este contenido, siempre que se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se comparta bajo la misma licencia que la obra original.

Las publicaciones acreditadas por el Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres(CENDITEL) son sometidas a un proceso de arbitraje por expertos en el área.

"La elección de áreas de investigación, de métodos y de criterios de evaluación es un acto político, condicionado por el tipo de sociedad que se desea construir... La ciencia debe dejar de ser un instrumento de adaptación al mercado para transformarse en un motor de cambio social y soberanía de los pueblos."

Oscar Varsavsky



Índice general

Hardware libre, apropiación social y soberanía tecnológica

Inteligencia artificial libre: Retos estratégicos para el desarrollo venezolano
Daniel Quintero 2

Construir la viabilidad del hardware científico abierto: Estudio de caso del microscopio OpenFlexure
Santiago Roca 25

El derecho a reparar como práctica de soberanía tecnológica: Fundamentos y estrategias para nodos de soberanía en las instituciones educativas venezolanas
Aida Andrade 43

Aprender para compartir: El impacto del uso de las Tecnologías Libres en Toparquía
Yazmary Rondón 54

Tecnologías Libres aplicadas a la gestión pública y social

Autonomía cognitiva y Tecnologías Libres en la gestión de empresas de triple impacto
María Alejandra Rujano 72

Tecnologías Libres en la gestión de proyectos de construcción
María Eugenia Acosta 90

Estándares abiertos para sistemas de infraestructura crítica: Un enfoque hacia la soberanía tecnológica
Pablo Sulbarán 111

Tecnologías Libres en el sector salud y alta complejidad

Desarrollo de un sistema de planificación de tratamiento en radioterapia externa: Principios conceptuales y una ruta hacia las Tecnologías Libres
Jesús Erazo 134

Autores

Autores
. 160

Prólogo

Desde la producción, uso y control del fuego hasta las centrales nucleares, pasando por la invención de la rueda, la imprenta, las máquinas de vapor, la pila voltaica, la fundición de materiales, los motores eléctricos, el vehículo autopropulsado, el bisturí, el microscopio, los tubos de rayos X, los aceleradores de partículas, la robótica y los drones, la técnica y la ingeniería han ayudado al ser humano a transformar radicalmente sus condiciones de vida, transporte, transmisión del conocimiento y manufactura, e inclusive a extender su expectativa de vida.

En tal sentido, resulta indiscutible señalar que la tecnología ha ampliado exponencialmente las capacidades motoras, cognitivas y perceptivas de la humanidad. En otras palabras, ha actuado como un amplificador de los sentidos o como una extensión orgánica que nos permite percibir y modificar el entorno; por tanto, desde tiempos inmemoriales, el hecho tecnológico ha sido un pilar constitutivo del desarrollo de los pueblos e inclusive de sus identidades culturales.

Sin embargo, a lo largo de la historia, esa misma tecnología ha funcionado también como pivote estratégico en el diseño, desarrollo y producción de armamento bélico. Por consiguiente, aquellos pueblos que han logrado hegemonizar la fabricación de material armamentístico y que, al mismo tiempo, se sitúan en la vanguardia del progreso agrícola, industrial, médico, digital y comunicacional, extienden su dominio, control y subordinación sobre aquellas naciones que permanecen en situación de dependencia tecnológica.

Adicionalmente, frente al galopante advenimiento de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, la computación cuántica, la minería espacial, los vehículos autónomos, el Internet de las Cosas (IoT) y los gemelos digitales, las potencias que lideraron las revoluciones industriales previas y la transición hacia la Industria 4.0 continuarán monopolizando la economía global e imponiendo sus modelos culturales y visiones del mundo. Ante este escenario, las naciones en desarrollo o con esquemas productivos artesanales enfrentan grandes desafíos para resistir y combatir la imposición de las corporaciones tecnológicas y complejas redes militares del Norte global.

Por lo tanto, para romper con estas asimetrías y superar la brecha de la dependencia tecnológica, se vuelve necesario desarrollar tecnologías propias, adaptadas a las realidades locales, comprometidas con la mitigación del cambio climático y despojadas de los sesgos hegemónicos de las *Big Tech*. Sin embargo, ¿cómo y por dónde empezar? Ciertamente, el punto de partida exige reconocer la urgencia de abordar este problema desde las Tecnologías Libres. Aunque la misión no es sencilla, resulta indispensable articular una investigación rigurosa en primera instancia, pues solo así será viable avanzar hacia el diseño, desarrollo y producción de soluciones soberanas que garanticen la inteligencia y soberanía tecnológica de nuestras sociedades.

Finalmente, en consonancia con la sagrada tradición y bajo el marco de referencia

filosófico de CENDITEL —que concibe al conocimiento como un bien público de libre acceso y reafirma el principio de la no neutralidad de la tecnología—, nos complace presentar la sexta edición de la Colección Óscar Varsavsky. Bajo el eje central Tecnologías Libres para el desarrollo estratégico de la nación, este volumen busca aportar a la construcción de la soberanía e inteligencia tecnológica del país desde una mirada transversal: aborda desde la ingeniería civil y la industria hasta reflexiones sobre propuestas tecnológicas de alto impacto social, pasando por los retos éticos de la inteligencia artificial, la creación de Sistemas de Planificación de Tratamiento en radioterapia, e incluso el análisis de las herramientas digitales como mediadoras pedagógicas en los procesos de enseñanza y aprendizaje.

En esta línea, en la primera sección del libro: **Hardware libre, apropiación social y soberanía tecnológica**, Daniel Quintero a través de su ensayo: *Inteligencia artificial libre: Retos estratégicos para el desarrollo venezolano*, examina los retos que enfrenta Venezuela para construir una inteligencia artificial soberana, sustentada en Tecnologías Libres capaces de reducir la dependencia estructural del país. Además, examina cómo otros países del Sur Global han enfrentado el mismo desafío. A continuación, Santiago Roca con su contribución titulada: *Construir la viabilidad del hardware científico abierto: Estudio de caso del microscopio OpenFlexure*; explora el estudio de las condiciones de viabilidad del hardware científico abierto en el contexto del ecosistema nacional de innovación, introduce el concepto de hardware científico abierto y describe el proyecto OpenFlexure. Luego expone las herramientas teórico-metodológicas de la investigación.

Seguidamente, Aida Andrade con su contribución: *El derecho a reparar como práctica de soberanía tecnológica: Fundamentos y estrategias para nodos de soberanía en las instituciones educativas venezolanas*; presenta los fundamentos del Derecho a Reparar como base técnica para la propuesta de reparación comunal en los planteles escolares venezolanos. Detalla qué es la reparación desde el software y el hardware libre, la arquitectura técnica del conocimiento para la reparación, la fundamentación de los nodos de reparación comunal y su impacto en las 7T y finalmente, un modelo de gestión sostenible. Yazmary Rondón a través de su ensayo: *Aprender para compartir: El impacto del uso de las Tecnologías Libres en Toparquía*; expone un desarrollo teórico sobre la importancia del uso de las Tecnologías Libres en la formación en línea y sus beneficios para aprender, contextualizar y distribuir contenidos o software, sin restricciones de licencias propietarias. Enfocándose en la soberanía digital mediante las herramientas de código abierto implementadas en el entorno virtual de formación de CENDITEL: Toparquía.

La segunda sección se centra en **Tecnologías Libres aplicadas a la gestión pública y social**, inicia con el ensayo de María Alejandra Rujano titulado: *Autonomía cognitiva y Tecnologías Libres en la gestión de empresas de triple impacto*; se enfoca en delinear una trayectoria posible para las empresas de triple impacto (económico, social y ambiental), con especial atención al contexto venezolano y latinoamericano. Ahora bien, dentro de sus proyecciones a futuro, María Eugenia Acosta presenta: *Tecnologías Libres en la gestión de proyectos de construcción*; muestra que la adopción de Tecnologías Libres en la construcción tiene implicaciones directas en la soberanía tecnológica de las organizaciones,

la interoperabilidad entre sistemas, la calidad del dato generado a lo largo del proyecto y la capacidad de innovación del sector. Pablo Sulbarán en *Estándares abiertos para sistemas de infraestructura crítica: Un enfoque hacia la soberanía tecnológica*; realiza un breve bosquejo de soluciones ya probadas e implementadas en distintos entornos de infraestructura crítica, tomando en cuenta su valor estratégico en términos de soberanía tecnológica.

En la tercera sección: **Tecnologías Libres en el sector salud y alta complejidad**, el autor Jesús Erazo a través de su escrito: *Desarrollo de un sistema de planificación de tratamiento en radioterapia externa: Principios conceptuales y una ruta hacia las Tecnologías Libres*; analiza el potencial de las Tecnologías Libres como una alternativa viable a los sistemas de planificación de tratamiento (TPS) privativos, con el fin de democratizar el acceso a la radioterapia.

En tal sentido, el presente libro no solo aborda temas de apropiación social y soberanía tecnológica. También ofrece una visión actualizada de las Tecnologías Libres aplicadas a la gestión pública y social, así como su aplicación en el sector salud y alta complejidad. Además, de su relevancia en el ámbito educativo para la formación de ciudadanos en la enseñanza de disciplinas técnicas específicas. Por supuesto, se hace necesaria la apropiación del conocimiento de estas tecnologías para comprender las trascendencias y dificultades conexas, porque es necesario recordar que ninguna herramienta tecnológica es completamente objetiva.

Jesús Erazo
Editor

Hardware libre, apropiación social y soberanía tecnológica



Inteligencia artificial libre: Retos estratégicos para el desarrollo venezolano

Daniel Quintero[1]

Introducción

En la segunda década del siglo XXI, la inteligencia artificial ha dejado de ser una promesa tecnológica para convertirse en un factor geopolítico de primer orden, con implicaciones directas sobre la soberanía de los Estados. El objetivo de este artículo es examinar los retos que enfrenta Venezuela para construir una inteligencia artificial soberana, sustentada en tecnologías libres capaces de reducir la dependencia estructural del país. Para ello, el texto se organiza en cinco apartados: el primero examina el fenómeno global de la soberanía en IA desde el Sur Global; el segundo aborda el camino venezolano hacia una IA soberana y segura; el tercero analiza los fundamentos deontológicos del Código de Ética para la IA en Venezuela; el cuarto discute los desafíos de la Seguridad de la Información en este contexto; y el quinto explora el rol prospectivo de CENDITEL.

El desarrollo de la IA en unas pocas empresas transnacionales plantea riesgos significativos para las naciones, especialmente en lo que respecta al control de los datos, la infraestructura crítica y la protección de la información sensible. A ello se suma que los modelos dominantes están entrenados predominantemente con datos en inglés y reflejan sesgos culturales, lingüísticos e ideológicos de los países del Norte hegemónico. Esa concentración del poder tecnológico no es un fenómeno neutral: responde a una lógica de acumulación y control que coloca a los países periféricos en una posición de dependencia estructural, donde la información generada en sus territorios es extraída, procesada y utilizada en beneficio de intereses externos.

El control sobre los datos y sobre la infraestructura que los procesa se ha convertido en un componente esencial de la soberanía tecnológica y la Defensa de la Nación. Los datos no son meros insumos técnicos, sino activos geopolíticos. Cuando los sistemas de IA procesan información de ciudadanos, empresas o instituciones públicas sin control nacional sobre su almacenamiento y uso, se abre una vulnerabilidad crítica que actores externos pueden explotar para fines de vigilancia, influencia política o agresión cibernética.

Frente a esta realidad, la adopción de tecnologías libres no es una elección técnica menor, sino una decisión política estratégica que permite a los países recuperar el control sobre su infraestructura digital, reducir la dependencia de proveedores extranjeros y proteger la información sensible de sus ciudadanos e instituciones. En un contexto marcado por

[1]Historiador, Abogado y Doctor en Ciencias Humanas, egresado de la Universidad de Los Andes (ULA). Actualmente se desempeña como docente en la ULA, y como investigador en el Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL). Autor y director de publicaciones académicas y de divulgación científica. dquintero@cenditel.gob.ve

tensiones geopolíticas y sanciones que restringen el acceso a tecnologías privativas, el software y hardware libres se convierten en una vía de resistencia y afirmación nacional.

Sin embargo, según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2025), en América Latina solo se cuenta con el 4,8 % de los centros de datos del mundo. Esta asimetría estructural, que algunos analistas han denominado brecha digital geopolítica, coloca a la región en una posición de vulnerabilidad frente a las potencias que controlan la infraestructura de datos global. En todo caso, también abre la posibilidad de construir estrategias regionales colaborativas que permitan desarrollar capacidades endógenas en IA, como lo demuestran diversas experiencias del Sur Global, entre ellas las de India, Sudáfrica y América Latina. En particular, Venezuela ha optado por un camino propio en esta materia, desplegando un conjunto articulado de instrumentos legales, institucionales y formativos que buscan sentar las bases para un ecosistema de IA con identidad nacional, ético y seguro.

Conviene precisar, para los fines de este artículo, qué se entiende por inteligencia artificial libre y por soberanía en IA. La primera nace del encuentro entre la IA y la tradición de las tecnologías libres: no se limita a la gratuidad del acceso, sino que exige que el modelo, los pesos y el código puedan examinarse, adaptarse y redistribuirse, de modo que una comunidad o un Estado no dependan de un proveedor externo para entender cómo decide el sistema, corregir sus sesgos o alojarlo en infraestructura propia. La segunda alude a la capacidad efectiva de un Estado y su sociedad para decidir sobre los datos, los algoritmos, la capacidad de cómputo, la infraestructura, el talento y el marco normativo que intervienen en el desarrollo y uso de estos sistemas. Estas dimensiones se articulan de manera sistémica —sin datos gobernados no hay algoritmos auditables, y sin infraestructura, talento o normas no hay garantías exigibles—, a lo que se suma la soberanía cognitiva: la capacidad de las personas y las comunidades para comprender, cuestionar y decidir frente a sistemas que intervienen en sus procesos de pensamiento y deliberación. Con estas precisiones, el artículo pasa a examinar cómo otros países del Sur Global han enfrentado el mismo desafío.

El fenómeno global de la soberanía en IA desde el Sur Global

La construcción de inteligencia artificial con identidad nacional ha dejado de ser una aspiración de unos pocos países para convertirse en un movimiento global que atraviesa el Sur Global con fuerza creciente. Como señalan Zhang y Chen (2026); la soberanía en IA constituye una práctica de gobernanza liderada por los Estados que, en el plano interno, busca equilibrar el desarrollo industrial con la gestión de riesgos de seguridad, y en el externo, persigue una autonomía estratégica que contrarreste la concentración de poder tecnológico en unas pocas corporaciones transnacionales. Este impulso soberanista responde a una convicción compartida: la IA es demasiado transformadora como para delegar su control en actores externos, por más poderosos que sean.

Frente a la concentración del poder tecnológico en los países del Norte hegemónico, las naciones del Sur Global han comenzado a articular respuestas propias. Estas iniciativas representan formas de resistencia y afirmación que buscan recuperar el control sobre los

datos, los algoritmos y las decisiones que afectan a sus sociedades. Explica Abiade (2025) que la proliferación de tecnologías de IA ha intensificado las interdependencias globales, particularmente en el ámbito de la vigilancia digital y la infraestructura de gobernanza, creando un nuevo paradigma de vulnerabilidad estratégica. El autor previo acuña el concepto de soberanía algorítmica para referirse a la capacidad de un Estado de ejercer control pleno sobre los datos, la infraestructura y la lógica de decisión de los sistemas algorítmicos que operan dentro de sus fronteras. En esta misma línea, Onuchukwu y Ohiro (2026) proponen el modelo de Dependencia Algorítmica y Soberanía de Datos (ADDSM) como herramienta diagnóstica para secuenciar reformas en gobernanza, infraestructura, economía y cumplimiento normativo.

Precisamente, Brasil constituye uno de los ejemplos más avanzados en esta dirección, lanzando el Plan Brasileño de Inteligencia Artificial (PBIA 2024-2028), que ha sido objeto de análisis académico. Así, Johansson et al. (2024) evalúan en qué medida el PBIA apoya la búsqueda de soberanía en IA, mapeando sus asignaciones financieras frente al marco de habilitadores clave en IA (KASE), y encuentran que las acciones estructurales del plan apoyan seis de los habilitadores, con prioridad en algoritmos, datos y capacidad de cómputo[2] . Ahora bien, ningún plan automáticamente genera soberanía e incluso puede ser contraproducente, Martins y Tonini (2025) examinan el PBIA como la expresión institucionalizada de un código técnico emergente, a la luz de la teoría crítica de la tecnología de Andrew Feenberg, concluyen que, aunque el plan moviliza un discurso ético-inclusivo centrado en la "IA para el bien de todos", su estructura revela el predominio de una racionalidad instrumental que subordina principios sociales a criterios de eficiencia y competitividad.

Teniendo cuidado con la salvedad expresada por los investigadores brasileños, igual es innegable que el PBIA ha representado un giro en la infraestructura y la regulación, encontrando eco en otras latitudes del Sur Global. Una muestra es la India, que ha emergido como otro polo de soberanía tecnológica en esta dirección, Anand et al. (2025) argumentan que la diversidad lingüística de India vuelve estructuralmente discordantes los LLM desarrollados en Occidente y que el imperativo es desarrollar modelos soberanos entrenados en corpus vernáculos para lograr una genuina inclusividad y mitigar el sesgo algorítmico. Los autores enmarcan la búsqueda india de LLM soberanos como una extensión de políticas como *Make in India y Atmanirbhar Bharat* (India autosuficiente), que no es un mero esfuerzo tecnológico aislado, sino una confluencia de estrategia económica, custodia cultural, gobernanza de datos y seguridad nacional. Del mismo modo, Palit y Kaur (2026) sostienen que India debería adoptar una estrategia de IA matizada, híbrida y escalonada, que equilibre la autonomía estratégica con la adaptación práctica, aprovechando alianzas público-privadas y la colaboración de código abierto para mejorar su soberanía digital sin

[2]**Nota del autor:** los ocho elementos del marco Key AI Sovereignty Enablers (KASE) para alcanzar la soberanía en materia de IA son: 1. Datos: gobernanza sólida de datos (personales) 2. Algoritmos: gobernanza algorítmica sólida 3. Capacidad de cómputo: capacidad computacional robusta 4. Conectividad significativa 5. Electricidad: suministro eléctrico fiable 6. Educación: población con alfabetización digital 7. Ciberseguridad: ciberseguridad sólida 8. Marco normativo adecuado.

replicar los modelos de las potencias líderes.

Si India ha puesto el acento en estrategias híbridas y Brasil en la soberanía algorítmica, Sudáfrica ofrece una tercera vía: la del hub regional que articula todo el continente. En septiembre de 2025, la University of Cape Town (UCT), en colaboración con el Centro Global de Gobernanza de la IA, lanzó el *African Hub on AI Safety, Peace and Security*, un espacio diseñado para garantizar que las perspectivas africanas ocupen un lugar central en los debates globales sobre seguridad de la IA (UCT, 2025). Este *hub* busca articular capacidades continentales que contrarresten la fragmentación que ha caracterizado históricamente la inserción de África en la economía digital global y estando su población infrarrepresentada en el diseño de los sistemas de IA. La estrategia sudafricana se complementa con la publicación de un borrador de Política Nacional de Inteligencia Artificial, que establece un marco de gobernanza integral y propone la creación de una Comisión Nacional de IA, un Consejo de Ética de la IA y una Autoridad Reguladora de la IA (Reuters, 2026). Esta doble apuesta —la articulación regional y el marco normativo nacional— revela una concepción de la soberanía como un proceso que opera simultáneamente en el plano material —el control de los datos y la infraestructura— y en el institucional —la construcción de capacidades regulatorias y de gobernanza que afirman una identidad tecnológica africana.

Esta lógica también está presente en experiencias como las de México y Marruecos, aunque con matices significativos, como señala Guerrero (2026), el gobierno mexicano presentó en abril de 2026 su Plan Nacional de Inteligencia Artificial, elaborado por la Agencia de Transformación Digital y Telecomunicaciones, que organiza la estrategia en torno a tres pilares: ética, capacidades e infraestructura. Sin embargo, según el análisis crítico de este autor, el Plan muestra fisuras notorias en lo que respecta a la gobernanza operativa, la medición de impacto y la sostenibilidad de la infraestructura soberana. Agrega Martínez-Del Campo (2026, p. 248) que México destaca a nivel regional en disponibilidad de datos, esta fortaleza contrasta con debilidades estructurales críticas, como la ausencia de una estrategia nacional integral y una preocupante falta de continuidad en sus políticas de digitalización.

Por otra parte, es importante mencionar la estrategia "Digital Morocco 2030" que busca posicionar al país como un *hub* de IA y *outsourcing* de alto valor, atrayendo gigantes tecnológicos y expandiendo su exportación digital. Para lograrlo, se basa en formar talento especializado, ofrecer incentivos competitivos, crear infraestructura de acogida y promover el país como destino tecnológico global (MTNRA, 2024). La hoja de ruta marroquí prioriza capas de alto apalancamiento y bajo costo —el procesamiento de datos, el modelado semántico y la curación de conocimiento cultural— como punto de entrada para investigadores independientes e instituciones pequeñas, en lugar de la construcción directa de infraestructura física (Baladi, 2026). El caso marroquí resulta paradigmático porque demuestra que la soberanía tecnológica no implica autarquía: el país mantiene alianzas multipolares y su sector de *offshoring* alcanza los 150.000 empleos (COPE, 2026). La soberanía, en esta visión, no es aislamiento sino capacidad de negociación y control de los activos digitales en un ecosistema global de alianzas. Sin embargo, un análisis del ecosistema

de gobernanza de IA en el norte de África señala, la ausencia de estrategias nacionales de IA de acceso público, así como la falta de cualquier estrategia formal, reflejando la madurez desigual, la fragmentación geopolítica de la región, las disparidades en infraestructuras y la capacidad estatal disímil (Ogoh et al., 2026).

Un referente en Oriente Medio es Arabia Saudita, que ofrece un modelo que por su naturaleza, resulta difícilmente replicable para la mayoría de los países del Sur Global, pero que ilustra una ruta posible para aquellos con capacidad de apalancamiento financiero. A través de su empresa de IA soberana HUMAIN, establecida por el Fondo de Inversión Pública (PIF), el país ha desarrollado HUMAIN-M3, un modelo de lenguaje para el mundo árabe construido sobre la base del modelo abierto chino MiniMax M3 y fue entrenado con billones de tokens en contenido árabe nativo y obtuvo un rendimiento superior a los modelos líderes en pruebas de referencia en lengua árabe (Humain, 2026). Más que el volumen de inversión, lo relevante es la estrategia de partir de un modelo abierto avanzado, adaptarlo con datos locales y construir soberanía desde la apertura y la colaboración, sin comenzar de cero. La lección es que la soberanía no obliga a reinventar la tecnología desde sus bases, sino que puede lograrse apropiando, adaptando y controlando tecnologías existentes, siempre que haya acceso al código y los datos; esta soberanía por adaptación resulta idónea para países con recursos limitados que no pueden competir por modelos fundacionales, pero sí controlar el ajuste fino, los datos locales y la infraestructura de despliegue.

El conjunto de estas experiencias revela que el Sur Global está transitando desde una posición de consumidor pasivo de tecnología hacia una de creador activo, reconociendo que la IA no es neutral y que su desarrollo debe estar alineado con los intereses, valores y culturas de cada sociedad. La diversidad de enfoques refleja que no existe un único camino hacia la soberanía tecnológica, sino múltiples rutas adaptadas a las realidades y capacidades de cada país. En el caso de Venezuela —como se analizará en las secciones siguientes—, se ha optado por una combinación de desarrollo de infraestructura propia, formación de talento, marco legal y adopción de tecnologías libres, una estrategia integral que aborda simultáneamente las dimensiones técnica, formativa, legal y política de la soberanía digital.

El camino venezolano hacia la inteligencia artificial soberana y segura

En 2025 se anunció el inicio de una Agenda Científica Nacional, que contemplaba 950 planes, de los cuales un 24 % estaba dedicado al área de salud y un 20 % a las ciencias sociales (MINCYT, 2025). Esa distribución mostraba en teoría una concepción integral del progreso tecnológico, en la que la IA no se entendía como un objetivo en sí mismo, sino como un medio orientado a atender los ámbitos prioritarios para el bienestar de la población. Ese mismo año, se produjo un giro significativo con la presentación del Plan Nacional de Inteligencia Artificial soberana y ética, promovido por el Ejecutivo Nacional, que se propuso crear herramientas tecnológicas autóctonas, aminorar la dependencia de plataformas foráneas y utilizarlas en áreas estratégicas como educación, salud y economía, resguardando a la vez la protección de los datos gestionados (AVN, 2025). En el marco de

esta propuesta se ejecutarían 65 proyectos que se conectaban con el apuntalamiento del Código de Ética para el Desarrollo y Aplicación Responsable de la IA y una ley marco para el desarrollo y uso ético de la inteligencia artificial, cuyos detalles se concretarían al año siguiente.

La experiencia nacional de la última década confirma que depender de centros hegemónicos de poder no es una opción inocua: condiciona la capacidad del Estado para decidir sobre su propia infraestructura y sus datos. En el caso de la inteligencia artificial, esa dependencia adquiere rasgos específicos que conviene examinar con precisión. Una investigación reciente sobre la situación de la región concluye que:

> América Latina es estructuralmente dependiente de corporaciones extranjeras, principalmente estadounidenses, para la infraestructura crítica de IA, incluyendo chips, servicios de nube y modelos de IA. A través de un extenso análisis documental y estudios de caso de más de diez países, la tesis destaca riesgos geopolíticos, económicos y sociales significativos, que incluyen patrones comerciales extractivos, preocupaciones de privacidad bajo leyes de vigilancia extranjeras y sesgos algorítmicos. (Amado, 2025, p. 2)[3] [Traducción del autor]

La dependencia tecnológica no es un simple accidente, sino el resultado de patrones históricos que el capitalismo cognitivo ha agudizado con la llegada de la IA generativa. Bajo esa óptica, la apuesta venezolana por un rumbo propio va más allá de lo técnico, pues representa una afirmación de autonomía ante las dinámicas de subordinación que han marcado la inserción de la región en la economía digital mundial. Invertir en infraestructura propia, formar talento y desarrollar proyectos de IA con identidad nacional constituye una respuesta concreta a un problema estructural que no se resuelve con medidas parciales.

Una acción en esa vía fue el Ecosistema Digital Seguro, presentado en mayo de 2026 por el Viceministerio de Desarrollo de las Tecnologías de la Información y la Comunicación, que concretaba la idea de una arquitectura integral que debería conectar cuatro instrumentos fundamentales: la Ley de Inteligencia Artificial, la Ley del Sistema Nacional de Tecnologías de Información, la Ley de Derechos Digitales y la Ley de Ciberseguridad (Correo del Orinoco, 2026). La interconexión de estos instrumentos era lo que confería coherencia al ecosistema, pues cada componente reforzaba a los demás en un entramado normativo donde la protección de datos no era un aspecto aislado, sino un principio transversal.

De los cuatro instrumentos, la Ley de Inteligencia Artificial era la más avanzada. En 2026 cursaba su segunda discusión en la Asamblea Nacional y contemplaba la creación del Instituto Nacional de Inteligencia Artificial que busca auditar los procesos intentado cuidar que esta tecnología sea humanista, libre de sesgos algorítmicos y que maneje los datos en

[3] **En su idioma original**: "Latin America is structurally dependent on foreign, primarily U.S.-based, corporations for critical AI infrastructure, including chips, cloud services, and AI models. Through extensive documentary analysis and case studies from over ten countries, the thesis highlights significant geopolitical, economic, and social risks, including exploitative trade patterns, privacy concerns under foreign surveillance laws, and algorithmic bias".

infraestructuras locales para no vulnerar la seguridad de la nación (MINCYT, 2026b). Este último aspecto es crucial para el resguardo de la información, pues garantizaría que los datos sensibles no fueran procesados en servidores extranjeros sujetos a legislaciones que podrían comprometer su confidencialidad.

Actualmente, la versión 8.4 de *Canaima GNU/Linux*, denominada *Kavanayén* y presentada en mayo de 2026, incorpora un conjunto de herramientas desarrolladas por la comunidad que consolidan su orientación hacia la soberanía tecnológica, entre las que se encuentran el Creador de Imágenes ISO Canaima, el Editor de Texto Canaima, Canaima Retoques, el Actualizador Canaima y la ISO Full, que integra los siete entornos de escritorio disponibles (CNTI, 2026). La actualización incorpora además *DeepRoot*, la primera aplicación venezolana para el acceso y uso soberano a la inteligencia artificial —un desarrollo pionero en el país y uno de los primeros de su tipo en América Latina—, que prioriza modelos con licencias libres y se presenta como una alternativa real a plataformas que promueven dependencia (DeepRoot, 2025). No obstante, conviene señalar que esta soberanía es aún parcial: *DeepRoot* es una interfaz desarrollada en Venezuela, pero los modelos de lenguaje que utiliza se ejecutan en servidores ubicados en el extranjero, lo que significa que las consultas y los datos de los usuarios siguen saliendo del territorio nacional. La limitación no invalida el logro, pero sí plantea una reflexión ineludible: la soberanía tecnológica no se completa con el control del código y la interfaz, sino que exige avanzar hacia la construcción de infraestructura de cómputo propia que permita alojar modelos de IA en territorio venezolano.

Precisamente en esa dirección se creó el Centro Tecnológico y de Gestión de Datos de Hidrocarburos, inaugurado en mayo de 2026, que constituye un hito en la construcción de infraestructura soberana para el procesamiento y almacenamiento de datos críticos (MinHidrocarburos, 2026b). Su estructura está diseñada para albergar tres pilares operativos fundamentales: el Banco Soberano de Datos de Petróleo y Gas; la Dirección Ejecutiva de Automatización, Informática y Telecomunicaciones de PDVSA; y el Viceministerio de Inteligencia Artificial y Eficiencia Productiva en Hidrocarburos. El Banco, que constituye el corazón de este complejo, es un servicio desconcentrado adscrito al Ministerio del Poder Popular de Hidrocarburos, cuyo propósito es garantizar un servicio de información geocientífica de exploración y producción de petróleo y gas, con control de calidad, seguridad y accesibilidad inmediata, ofreciendo a la nación soberanía y preservación de los datos (MinHidrocarburos, 2026a). Este complejo estratégico resguarda más de 800 terabytes de información geocientífica crítica, consolidando la soberanía, procesamiento y gobernanza de la información técnica de la industria petrolera, gasífera y petroquímica nacional.

Fundamentos deontológicos del Código de Ética para la IA en Venezuela

La deontología, entendida como la teoría de los deberes y principios que deben regir una práctica profesional, proporciona el marco conceptual para analizar el Código de Ética para la IA en Venezuela. En su vertiente jurídica, esta disciplina encuentra su origen en

la obra de Jeremy Bentham, quien acuñó el término a partir de las raíces griegas: "La palabra Deontología se deriva de los dos vocablos griegos, *τῶ δέον* (lo que es conveniente) y *λόγια* (conocimiento); que es como si dijéramos, el conocimiento de lo que es justo y conveniente" (Bentham, 1834, p. 21). Más allá de esta dimensión fundacional, la irrupción de la tecnología en el campo jurídico ha planteado nuevos desafíos, como señala Solar (2021): "El desarrollo de la inteligencia artificial jurídica está provocando transformaciones sustanciales en el ejercicio de la abogacía que plantean enormes retos deontológicos" (p. 123). El mismo autor advierte que este nuevo escenario exige que el profesional adquiera nuevos tipos de competencias y habilidades adicionales a las de carácter estrictamente técnico-jurídico, implicando una redefinición de los deberes tradicionales a la luz de las posibilidades y riesgos que introduce la automatización de procesos decisorios.

En el contexto de la IA, lo ético cobra relevancia porque los sistemas automatizados toman decisiones que impactan la vida de las personas y dichas decisiones deben estar sujetas a principios de justicia, transparencia y responsabilidad. Expresa Ollero (2003), que la deontología jurídica es "...la suma de todas las exigencias éticas planteadas a un jurista con ocasión del ejercicio de su profesión; algo así como un mapa de todos sus imaginables problemas de conciencia" (p. 665). Esos problemas de conciencia en la contemporaneidad se ven amplificados por la irrupción de variables artificiales en el quehacer jurídico.

La construcción de un marco deontológico para la IA en Venezuela debe trascender la mera regulación técnica para adentrarse en la dimensión política y cognitiva de lo tecno/social, reconociendo que la IA no es neutral y que sus efectos dependen de quién la diseña, con qué datos y para qué fines. El Código venezolano se nutre de experiencias internacionales —la Recomendación de la UNESCO sobre la Ética de la IA (2021), las Directrices Éticas para una IA Fiable de la Comisión Europea (2019), los Principios de IA de la OCDE (2022), la Declaración de Montreal (2018)— intentando adaptarlas al contexto nacional. Este enfoque busca evadir la mera importación de principios desarrollados en contextos muy diferentes, coadyuvando a que la regulación responda a las necesidades y particularidades de la realidad local. Empero, no basta con formular principios: el desafío central reside en la gobernanza que los hace operativos. El modelo de referencia de Martorell y Porrúa (2026) para políticas de IA en el sector público señala que:

> Un marco de gobernanza robusto constituye la base para la adopción exitosa de la IA en el sector público. Los países deben establecer estrategias nacionales de IA con objetivos claros y planes de acción concretos, alineados con las metas de desarrollo esperadas. Estas estrategias deben contar con el apoyo político de alto nivel y delinear principios para un uso ético, seguro y confiable de la IA en el gobierno. Por ejemplo, asegurar la explicabilidad, la transparencia y la no discriminación de los algoritmos públicos es clave para mantener la confianza ciudadana. Varios países de ALC han elaborado estrategias nacionales de IA; sin embargo, solo una minoría ha asignado recursos o definido planes detallados para implementarlas, lo que pone de relieve la necesidad de fortalecer la efectividad de la gobernanza de la IA en la región. (p. 7)

Los autores subrayan que el problema no es la ausencia de estrategias, sino la falta de recursos y planes detallados para ejecutarlas, lo que evidencia una distancia entre el diseño normativo y la capacidad institucional. Para el caso venezolano, esta advertencia es pertinente porque el país ha avanzado en la formulación de un marco de gobernanza —el Ecosistema Digital Seguro y sus leyes asociadas—, pero su efectividad dependerá de que existan recursos asignados, planes de acción concretos y mecanismos de fiscalización que permitan traducir los principios del Código de Ética en prácticas verificables. La articulación entre gobernanza, infraestructura y talento que la experiencia regional identifica como condición para una política de IA soberana sólo adquiere sentido cuando la estrategia nacional cuenta con respaldo político sostenido y presupuesto plurianual.

En el ámbito regional, el Manifiesto EIA (Ética de la IA Latam) propone un conjunto de principios orientadores que incorporan categorías conceptuales originales como soberanía cognitiva, autoridad epistémica, aplicaciones de alto impacto, supervisión humana significativa, auditabilidad, justicia algorítmica, colonialismo digital, colectivo inteligente ampliado. Ese primer concepto delinea la idea general del manifiesto:

> Se entiende por soberanía cognitiva la capacidad de las personas y las comunidades para conservar, desarrollar y ejercer de manera autónoma sus facultades de comprensión, juicio crítico, deliberación, producción de sentido y decisión frente a sistemas tecnológicos capaces de influir, orientar o condicionar dichos procesos.
>
> La soberanía cognitiva no supone aislamiento respecto de los sistemas inteligentes ni rechazo de la cooperación humano–máquina. Implica, por el contrario, preservar condiciones efectivas de comprensión, intervención, responsabilidad y participación en entornos donde las decisiones, los conocimientos y las formas de interacción se encuentran crecientemente mediados por inteligencia artificial. (Comité EIA LATAM, 2026, p. 17)

La importancia de esta categoría radica en que amplía la noción de soberanía: ya no se limita al control de infraestructuras, datos y código, sino que abarca la capacidad de las sociedades para comprender, cuestionar y decidir. Esta perspectiva dialoga con la apuesta venezolana por una IA humanista y soberana. La diferencia está en que el Manifiesto aporta el andamiaje conceptual, mientras Venezuela intenta traducirlo en instrumentos jurídicos concretos —la Ley de Inteligencia Artificial, la Ley de Derechos Digitales, la Ley del Sistema Nacional de Tecnologías de Información y la Ley de Ciberseguridad—, de modo que la ética no quede como declaración de buenas intenciones sino que cuente con respaldo legal y mecanismos de aplicación.

Para evaluar en qué medida el Código venezolano logra cerrar esa brecha entre visión e implementación, resulta necesario examinar sus principios fundamentales y la manera en que cada uno contribuye a traducir los postulados éticos en prácticas fiscalizables. El Código de Ética para el Desarrollo y Aplicación Responsable de la Inteligencia Artificial, presentado en febrero de 2026 por el Ministerio del Poder Popular para Ciencia y Tecnología,

establece nueve principios fundamentales para orientar el uso de estas tecnologías bajo criterios éticos y en beneficio del bien común (MINCYT, 2026a). El Código se inscribe en la tradición deontológica al establecer que el desarrollo tecnológico debe estar subordinado a la preservación de la vida, la dignidad humana y el respeto a los derechos fundamentales. El propio Código señala en su preámbulo:

> En este sentido, el presente Código de Ética para el Desarrollo y Aplicación responsable de la Inteligencia Artificial establece nueve principios fundamentales que buscan orientar el uso de esta tecnología en Venezuela. Estos principios incluyen la IA humanista, la equidad, la responsabilidad ambiental, la seguridad, la privacidad, la transparencia, la rendición de cuentas, la ciencia abierta y la excelencia. Cada uno de estos principios están enmarcados en el conocimiento del consenso mundial en el área de la IA y toma en consideración la realidad regional y nacional de Venezuela, así como los fundamentos teóricos y científicos de esta disciplina, y su objetivo primordial es fomentar que todos los actores e involucrados en los procesos de investigación, desarrollo, innovación y aplicación de los sistemas de inteligencia artificial, así como de los usuarios de esta tecnología, generen y usen una herramienta que sirva al bien común, respete los derechos humanos, la naturaleza, y contribuya a la construcción de un futuro más justo y sostenible para el bien de nuestros pueblos. (MINCYT, 2026a, p. 4)

El texto no se limita a enumerar deberes, sino que busca articular el consenso internacional con las particularidades de la realidad venezolana, asumiendo la ética no como un límite externo a la innovación, sino como una condición inherente a ella. Esa orientación se despliega en los nueve postulados, cuyo examen permite valorar en qué medida logran traducirse en prácticas concretas. El primer principio, Inteligencia Artificial Humanista, establece que la IA debe estar centrada en el ser humano y prevenir cualquier forma de daño, incluyendo el respeto a la autonomía humana, la prevención del daño físico, mental o social, el respeto a los derechos humanos, la defensa de la democracia y el Estado de derecho (MINCYT, 2026a). Esta perspectiva implica que los sistemas de IA deben ser diseñados para servir a las personas y no al revés.

En el segundo referente, Equidad, exige que los sistemas de IA no reproduzcan ni amplifiquen desigualdades preexistentes, y que su diseño incorpore criterios de justicia distributiva y evite la homogeneización social (MINCYT, 2026a). Esto es relevante pues advierte que la automatización de decisiones puede profundizar exclusiones históricas si no se corrige desde el diseño. La equidad, así entendida, no es un resultado espontáneo del progreso técnico, sino una exigencia que debe integrarse en cada etapa del ciclo de vida del sistema.

El tercer apartado, Responsabilidad Ambiental, incorpora la consideración de los impactos ecológicos asociados al desarrollo, entrenamiento y operación de sistemas de IA, e insta a evitar que los costos ambientales se transfieran de manera desproporcionada a comunidades vulnerables (MINCYT, 2026a). Esta inclusión es significativa porque profundiza el alcance de la ética de la IA más allá de lo estrictamente humano, reconociendo

que la infraestructura computacional requiere energía, agua y recursos materiales cuyo costo no se distribuye de manera homogénea. En el contexto venezolano, donde las desigualdades sociales se superponen con las ambientales, este principio es determinante.

El cuarto marco, Seguridad, se aborda en tres niveles: protección de datos, seguridad del modelo frente a la manipulación y seguridad de la infraestructura física y digital (MINCYT, 2026a). Esta triple dimensión muestra una comprensión integral de la seguridad, que no se agota en la protección de la información almacenada sino que abarca la integridad del propio sistema y las condiciones materiales que lo sostienen. Que estos niveles operen de forma conjunta implica que una vulnerabilidad en cualquiera de ellos compromete el conjunto. El quinto principio, Privacidad, se define como un derecho fundamental, estableciendo:

> La privacidad es un derecho fundamental que debe ser respetado intrínsecamente en el diseño y la utilización de sistemas de inteligencia artificial. De modo que la gestión de datos personales debe caracterizarse por la claridad, la transparencia y el respeto de los usuarios. Este principio esencial salvaguarda la protección de la información personal y el control sobre los datos.
>
> La protección de la información personal implica que la recolección, el almacenamiento, el uso, la desincorporación o eliminación de datos o información sensible por parte de los sistemas de IA deben realizarse respetando de manera escrupulosa la privacidad de los individuos y las leyes de datos. Esto es una prioridad absoluta en el desarrollo y la aplicación de los sistemas de IA.
>
> Por otro lado, toda aplicación o sistema de IA deberá requerir el consentimiento informado de los usuarios antes de recopilar y utilizar sus datos personales. Se debe garantizar la transparencia sobre el uso que se dará a los datos y ofrecer mecanismos efectivos para que los usuarios puedan ejercer sus derechos de acceso, rectificación, cancelación y oposición. Además, se deben obtener únicamente los datos necesarios para la finalidad específica del sistema de IA, evitando la recopilación excesiva o innecesaria de información personal. (MINCYT, 2026a, p. 23)

Situar la privacidad en el núcleo del diseño y no como un añadido posterior implica que la protección de datos debe operar desde la arquitectura misma del sistema. Al exigir consentimiento informado, finalidad específica y mecanismos de acceso, rectificación, cancelación y oposición, el Código establece obligaciones concretas que, de aplicarse, otorgan a los ciudadanos un control efectivo sobre su información.

El sexto principio, Transparencia, establece que los sistemas de IA deben ser comprensibles, explicables y auditables, enfatizando la trazabilidad de decisiones, especialmente en sectores críticos como salud y justicia (MINCYT, 2026a). La transparencia responde a uno de los problemas más señalados en la literatura sobre gobernanza de IA: la opacidad de los sistemas como obstáculo para la rendición de cuentas y el ejercicio de

derechos. Si un ciudadano no puede comprender por qué se tomó una decisión automatizada que lo afecta, difícilmente podrá impugnarla.

La Rendición de Cuentas es el séptimo principio, exige mecanismos claros para identificar y sancionar malas prácticas, y prohíbe que la IA sea utilizada para evadir responsabilidades (MINCYT, 2026a). La rendición de cuentas traslada la responsabilidad desde el sistema hacia los actores humanos que lo diseñan, implantan y regulan, evitando que la complejidad técnica se convierta en refugio de la impunidad. El octavo apartado, Ciencia Abierta, se inspira en la recomendación sobre Ciencia Abierta de la UNESCO para brindar acceso abierto al conocimiento, a través del código abierto y del software libre, la colaboración global y la democratización tecnológica (MINCYT, 2026a). La ciencia abierta conecta directamente con la apuesta venezolana por las tecnologías libres, pues la transparencia y la auditabilidad solo son posibles cuando el código puede ser examinado, modificado y redistribuido sin restricciones privativas. Se cierra con el noveno principio: Excelencia, que impulsa la investigación de vanguardia y la formación de talento humano:

> Para lograrlo, es esencial promover un entorno que impulse la investigación de vanguardia, fomentando la colaboración entre la academia, la industria y el gobierno, así como la investigación interdisciplinaria, tanto teórica como aplicada. Esto incluye invertir en la construcción de capacidades, apoyar proyectos de investigación de punta y crear condiciones que favorezcan la innovación y el desarrollo de soluciones tecnológicas de alto impacto. La excelencia en IA no solo se mide por los resultados, sino también por la capacidad y mirada crítica de sus profesionales para contribuir al avance del conocimiento, participar en iniciativas globales y mantener estándares de calidad que compitan con los mejores del mundo. (MINCYT, 2026a, p. 31)

Incluir la excelencia como principio ético reconoce que la autonomía tecnológica no es solo una cuestión política, sino que exige invertir en capacidades propias de su Talento Humano, ya que serán ellos en última instancia quienes garantizarán que los datos críticos no queden sujetos a legislaciones extranjeras que podrían comprometer su confidencialidad.

El vínculo entre los principios del Código se manifiesta en varios niveles. En primer lugar, los principios de Privacidad y Seguridad reconocen explícitamente la protección de los datos como un derecho fundamental y una condición para la confianza en los sistemas de IA. En segundo lugar, el principio de Excelencia impulsa la inversión en capacidades propias y el desarrollo de talento nacional, lo que constituye una salvaguarda frente a la dependencia de infraestructuras y legislaciones extranjeras. En tercer lugar, las exigencias de Transparencia y Rendición de Cuentas permiten que los ciudadanos ejerzan un control efectivo sobre el uso de sus datos. El Código venezolano integra así la protección de la información como un eje estructural de su propuesta deontológica. El principal desafío es su efectividad, que dependerá de la capacidad para traducir los principios en prácticas concretas y fiscalizables.

Seguridad de la Información en la IA soberana: Desafíos para Venezuela

El análisis de los principios del Código de Ética dejó abierta una interrogante: si el marco normativo reconoce la privacidad y la protección de datos como derechos fundamentales y la auditoría como condición de confianza, ¿cómo se traduce eso en prácticas concretas de Seguridad de la Información? La irrupción de la IA introduce riesgos específicos que Venezuela debe gestionar de manera soberana, pues no se trata solo de proteger datos, sino de protegerlos frente a capacidades de procesamiento que antes no existían. Como advierte Sheriffdeen Folaranmi Abiade, muchos Estados del Sur Global han adoptado plataformas de vigilancia basadas en IA construidas por actores geopolíticos dominantes, lo que introduce riesgos críticos de seguridad, privacidad y soberanía política. Esa dependencia se concreta en ocho atributos: código cerrado o restringido, datos controlados por el vendedor, actualizaciones remotas sin veto local, alojamiento en nubes extranjeras, auditorías de circuito cerrado, personalización mínima, control jurisdiccional foráneo y transparencia algorítmica nula o parcial (Abiade, 2025). Esta advertencia es especialmente relevante para Venezuela, que ha sido objeto de sanciones, ataques cibernéticos, y cuyo sector estatal maneja datos sensibles en salud, educación, hidrocarburos y administración pública.

Para comprender la magnitud del desafío, conviene considerar tres ejemplos: un modelo de lenguaje puede inferir información sensible a partir de datos aparentemente inocuos, un sistema de visión artificial puede identificar personas en espacios públicos sin su consentimiento, y un algoritmo de recomendación puede manipular la opinión pública a escala masiva. Estos riesgos no son hipotéticos; en su informe de 2025, la Relatoría Especial para la Libertad de Expresión de la Comisión Interamericana de Derechos Humanos denunció que en toda la región se han implementado tecnologías de vigilancia —tales como software espía comercial, sistemas de reconocimiento facial, rastreo por geolocalización y recolección masiva de datos— sin marcos legales adecuados, con una supervisión deficiente y una transparencia casi nula. Asimismo, advirtió que en numerosos contextos estas herramientas no se emplean para fines legítimos de aplicación de la ley o seguridad nacional, sino como instrumentos de control político, represión de la disidencia y censura (IACHR, 2025). Frente a este panorama, el país debe abordar cuatro frentes, pero con una advertencia inicial: la legislación propuesta —incluido el Código de Ética y la futura Ley de IA— puede quedar corta frente a la velocidad de los avances tecnológicos. La norma siempre llega después de la innovación, y ese desfase es en sí mismo un riesgo de seguridad. Por ello, cualquier estrategia de Seguridad de la Información en IA debe ser adaptable y revisable periódicamente, con mecanismos de actualización normativa y técnica que no dependan de la aprobación de nuevas leyes para responder a amenazas emergentes.

La seguridad de los datos venezolanos constituye el primer frente, esto exige construir corpus soberanos con anonimización, consentimiento informado y cumplimiento de los principios de Privacidad y Seguridad. No basta con que estos principios existan en el papel: se requieren mecanismos técnicos de verificación y auditoría que la ley no puede prever con la suficiente anticipación. El objetivo es claro: garantizar que los datos de

ciudadanos, empresas y del Estado no sean procesados en infraestructura extranjera donde podrían ser objeto de vigilancia o extracción. Pensemos, por ejemplo, en el uso de servicios de nube extranjeros para almacenar datos de salud o de identificación ciudadana, que quedan sujetos a legislaciones foráneas que permiten el acceso a datos almacenados por empresas de esos países, incluso si los datos pertenecen a ciudadanos venezolanos. Para lograrlo, es fundamental que Venezuela desarrolle su propia capacidad de almacenamiento y procesamiento, lo que no implica autarquía tecnológica, sino capacidad de negociación y control: se puede usar infraestructura extranjera para desarrollos no sensibles, pero los datos críticos deben permanecer en territorio nacional o en jurisdicciones que garanticen estándares equivalentes de protección.

El segundo frente lo constituye la seguridad de los modelos que operan en el país, que incluye la protección contra ataques adversariales, el envenenamiento de datos, la extracción de modelos y la auditoría de sesgos y explicabilidad. Al respecto, De Melo (2025) subraya que la verdadera soberanía sobre los modelos de lenguaje solo emerge de la sinergia de cuatro elementos: licencias transparentes, infraestructura soberana, corpus públicos y desarrollo continuo de telento humano. Dado que se trata de riesgos técnicos en rápida evolución, se requiere en el país un laboratorio de *red teaming* y auditoría de modelos abiertos que garantice que los sistemas de IA desplegados en sectores críticos —salud, hidrocarburos, educación, administración pública— cumplan con los principios de Transparencia y Rendición de Cuentas del marco ético vigente, pero también con estándares técnicos que van más allá de lo que la ley puede especificar. Así, por ejemplo, un ataque adversarial puede alterar el funcionamiento de un sistema de diagnóstico médico con solo modificar unos pocos píxeles en una imagen, lo que podría llevar a un diagnóstico erróneo y poner en riesgo vidas humanas. Por ello, la auditoría técnica independiente no es un lujo, sino una condición para la seguridad, y debe ser continua, no un evento único, porque los modelos pueden degradarse con el tiempo o volverse vulnerables ante nuevos ataques.

Como condición material para los dos frentes anteriores, se encuentra la seguridad de la infraestructura nacional, que involucra soberanía de cómputo, nube nacional, hardware libre y control de la cadena de suministro. En palabras de García et al. (2025) analizando la seguridad mejorada y soberanía de datos:

> La presencia de centros de datos en una ubicación impulsa la capacidad de que los datos permanezcan dentro de las fronteras del país, mejorando la seguridad de los datos y permitiendo el cumplimiento de las regulaciones nacionales e internacionales sobre datos. Esto puede ser particularmente importante a medida que los países entran en regulaciones, cooperación y acuerdos internacionales sobre datos al convertirse en centros de infraestructura digital global. (p. 8)[4] [Traducción del autor]

[4]**En su idioma original**: "The presence of DCs in a location drives capabilities for data to stay within the country's borders, enhancing data security and enabling compliance with national and international data regulations. This can be particularly important as countries enter into international data regulations, cooperation, and agreements as they become global DIHs".

Aquí es imperioso pensar en la posibilidad que un proveedor extranjero de nube decida suspender el servicio a Venezuela por razones políticas, como ya ha ocurrido con otras plataformas digitales en el pasado, dejando al Estado sin acceso a sus propios datos. Una vía para revertir esta situación es la replicación del modelo del Banco Soberano de Datos en otros sectores estratégicos, de modo que los datos críticos de la nación permanezcan en territorio venezolano.

Finalmente, se reitera que estos frentes requieren la capacitación venezolana en seguridad de IA —con certificaciones en privacidad diferencial, cifrado homomórfico, defensa adversarial y gestión de incidentes—, esa es la condición que hace posible los tres frentes anteriores. Según la Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) ente internacional de referencia en el análisis de políticas públicas, la evidencia de que el panorama de desarrollo de la IA generativa es altamente dinámico apunta a la necesidad de políticas que respalden continuamente la innovación y reduzcan las barreras de entrada, detallando:

> En particular, el acceso a recursos clave, como la capacidad de cómputo y la mano de obra cualificada, debería ser una prioridad para las empresas emergentes que buscan tanto desarrollar como adoptar IA. La heterogeneidad en la proporción de trabajadores con educación superior entre empresas con distintos niveles de exposición a la IA generativa también refuerza la necesidad de invertir continuamente en competencias. Si el uso eficaz de la IA requiere una fuerza laboral altamente cualificada, las barreras para acceder a las competencias pertinentes en este ámbito podrían convertirse, en la práctica, en barreras de entrada a mercados intensivos en IA. En este sentido, las políticas relativas al mercado laboral y a la formación de competencias podrían tener repercusiones directas en la competencia. (OECD, 2026, p. 52)[5] [Traducción del autor]

Esta advertencia es especialmente pertinente para Venezuela: si el acceso a cómputo y a talento cualificado se convierte en una barrera de entrada, el país queda excluido del desarrollo intensivo en IA, el margen de amenaza aumenta y se pierde soberanía. En consecuencia, no basta con operadores técnicos: se necesita una comunidad de investigadores capaces de auditar y mejorar los sistemas desplegados, conectada con universidades, centros de investigación y el sector productivo, con acceso a laboratorios equipados con *Graphics Processing Units* (GPUs) para experimentar con modelos abiertos y técnicas de seguridad.

El rol prospectivo de CENDITEL en la IA venezolana

El Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL) nació con el propósito de impulsar procesos que permitieran a la ciencia, la tecnología y la

[5] **En su idioma original**: "In particular, access to key inputs such as computational power and skilled labour should be a priority for start-ups both looking to develop and to adopt AI. The heterogeneity in the share of the workforce with tertiary education between firms with different levels of GenAI exposure also reinforces the need for continued investment in skills. If the effective use of AI requires a highly skilled workforce, then barriers to accessing AI-relevant skills may effectively become barriers to entry in AI-intensive markets. In this sense, labour market and skills policies could have direct implications for competition".

innovación cumplir su verdadero papel en el desarrollo económico, social y político del país. Su concepción y acción se sustentan en dos principios: el conocimiento es un bien público y la tecnología no es neutra. Esta identidad institucional lo posiciona como el actor idóneo para liderar una IA soberana basada en tecnologías libres, no solo como desarrollador, sino también como articulador de un ecosistema nacional de innovación disruptiva. Sin embargo, su capacidad de acción está condicionada por la inversión estatal, no solo frente a naciones del Norte hegemónico sino con relación a otros países del Sur Global. Pero, esta asimetría que es parte de una tendencia global puede significar una oportunidad, en el AI Index Report 2026 de la Universidad de Stanford se documenta con precisión:

> La soberanía en materia de IA se está convirtiendo en un rasgo distintivo de las políticas nacionales, aunque las capacidades siguen siendo desiguales, incluso a medida que el desarrollo de código abierto contribuye a redistribuir la participación. Las estrategias nacionales de IA se están expandiendo, especialmente en las economías en desarrollo, y paralelamente aumentan las inversiones estatales en supercomputación para IA, lo que refleja una creciente ambición por ejercer un control interno sobre los ecosistemas de esta tecnología. No obstante, la producción de modelos sigue concentrada en Estados Unidos y China. El desarrollo de código abierto está empezando a redistribuir la participación: las contribuciones del resto del mundo en GitHub ya superan a las de Europa y se acercan a las de Estados Unidos, impulsando así la creación de modelos y pruebas de referencia lingüísticamente más diversos. (Stanford HAI, 2026, p. 11)[6] [Traducción del autor]

La cita es reveladora: confirma que la apuesta venezolana por la soberanía no es una anomalía, sino parte de un movimiento global; y sobre todo, que el código abierto es la vía realista para que países con recursos limitados participen en la construcción de capacidades propias. En ese sentido, CENDITEL no parte de cero: los proyectos de software libre desarrollados a lo largo de sus 20 años lo colocan en una posición idónea para traducir esa orientación global en capacidades concretas.

Esta visión es respaldada por organismos multilaterales como la International Telecommunication Union (ITU), Cosmas Luckyson Zavazava, Director de la Telecommunication Development Bureau, subrayó que el acceso a una IA confiable sigue siendo muy desigual y que los países en desarrollo enfrentan desafíos clave como gobernanza, transparencia, soberanía digital, interoperabilidad, desarrollo de capacidades y sostenibilidad a largo plazo[7]. Frente a ello, presentó GENIE.AI, un marco que adopta principios de código abierto1 que permiten a los países reducir la dependencia de tecnologías

[6] **En su idioma original**: "AI sovereignty is becoming a defining feature of national policy, but capabilities remain uneven, even as open-source development helps to redistribute who participates. National AI strategies are expanding, particularly among developing economies, and state-backed investments in AI supercomputing are rising in parallel—a sign of growing ambitions for domestic control over AI ecosystems. Yet model production remains concentrated in the U.S. and China. Open-source development is starting to redistribute participation, with contributions from the rest of the world now outpacing Europe and approaching the United States on GitHub, fueling more linguistically diverse models and benchmarks".

[7] **Nota del autor:** Aunque en el discurso de la ITU se emplea el término "código abierto"

propietarias, fortalecer los ecosistemas de innovación local, fomentar el desarrollo de habilidades y construir capacidades nacionales sostenibles (Zavazava, 2026, párrs. 2, 5). Para la institución, esa propuesta es relevante porque comparte una lógica afín —aunque no idéntica— que se expresa en aspectos como su arquitectura abierta, el énfasis en el control local, la no dependencia y la orientación al interés general. Sobre esa base, CENDITEL puede construir una IA soberana y libre adaptada al contexto venezolano.

Esa apuesta por una IA libre y adaptada no se dirime en la competencia por infraestructura de clase mundial. La fortaleza está en otro lugar: articular, asesorar y formar el ecosistema que permita atraer y gestionar inversión, además de impulsar tecnologías disruptivas adaptadas al contexto venezolano. No obstante, esa función exige un presupuesto a la altura de sus tareas: cómputo para modelos libres, talento crítico y un espacio editorial donde publicar y debatir los resultados. La United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD, 2025) respalda esta orientación al señalar que:

> La innovación abierta ofrece una vía para gestionar el proceso de innovación y facilitar la colaboración y el intercambio de conocimientos entre innovadores independientes, empresas, instituciones y países. A diferencia del modelo tradicional de innovación, en el que cada empresa depende de sus propios recursos, la innovación abierta anima a las empresas, a las organizaciones públicas y a otros agentes a aprovechar el amplio conjunto de recursos innovadores disponibles en el entorno externo, incluidos clientes y ciudadanos. La innovación abierta puede acelerar la investigación y el desarrollo, reducir costes y mejorar la calidad o la relevancia de los resultados de la innovación, lo cual resulta especialmente beneficioso para los países en desarrollo y las pymes, al permitirles compensar la limitación de recursos y capacidades. (p. 161)[8] [Traducción del autor]

Esa descripción se ajusta al caso venezolano: actores valiosos pero inconexos, capacidades dispersas y una limitación de recursos que ningún esfuerzo aislado puede compensar. Frente a ello, la innovación abierta propone lo contrario: articular recursos externos, compartir conocimiento y sumar capacidades entre instituciones, empresas y ciudadanos. Bajo ese

(open source), que se rige por los diez criterios de la Open Source Initiative (OSI) y admite mayor flexibilidad con licencias comerciales, CENDITEL se inscribe en la tradición del software libre, promovido por la Free Software Foundation (FSF), que exige de forma estricta el respeto permanente de las cuatro libertades del usuario —usar, estudiar, modificar y distribuir— sin restricciones añadidas. Ambos movimientos comparten raíces y convergen en la mayoría de los casos, pero esta diferencia importa cuando se trata de garantizar que la tecnología no quede sujeta a intereses privados. Ver: Open Source Initiative (2024). The Open Source Definition y Free Software Foundation (2024). What is free software? https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.html

[8] **En su idioma original**: “Open innovation provides a way of managing the innovation process and enabling collaboration and knowledge sharing among independent innovators, companies, institutions and countries. Compared with the traditional model of innovation where each company relies on its own resources, open innovation encourages firms, public organizations and other actors to tap into the large pool of innovative resources available among external actors, including customers and citizens. Open innovation can speed up research and development, lower costs and enhance the quality or relevance of innovationoutcomes,10 which is particularly beneficial for developing countries and SMEs, to compensate for limited resources and skills”.

enfoque, el papel de CENDITEL resulta estratégico, pues su experiencia en tecnologías libres y su misión de crear redes lo colocan como el actor llamado a operar esa propuesta en el terreno de la IA. Ahora bien, para que sus acciones trasciendan el ámbito intra-institucional y se conviertan en política de Estado, se requiere direccionamiento desde el más alto nivel de gobierno. La creatividad *cenditelita* ha sostenido proyectos de tecnologías libres a lo largo de sus 20 años — SINIDOT (salud pública), SINIIF (gestión ambiental), KAVAC (gestión administrativa), HARUKO (hardware libre para salud), Cayapa Heroica (recuperación de equipos médicos), SIPES-APN (planificación pública), SIGESIC (información económica), Red Patria (comunicación popular), Toparquía (formación en línea) o la Colección Oscar Varsavsky (pensamiento crítico), entre otros— (CENDITEL, 2026). Esto demuestra su madurez y lo coloca como un referente natural para incorporarse a una secretaría técnica del futuro Instituto Nacional de Inteligencia Artificial o coordinando una instancia interestatal que integre a los sectores estratégicos de ciencia, tecnología, salud, educación, agricultura, hidrocarburos y administración pública, junto con academias, comunidades de tecnólogos y entes reguladores. Esta instancia impulsaría un "Nodo Venezolano de IA Libre" que conecte estas redes y aporte corpus, modelos y gobernanza, tomando como referencia experiencias del Sur Global.

En vista de lo anterior, se proponen cuatro líneas de acción concretas para la institución. La primera consiste en replicar el modelo del Banco Soberano de Datos en salud, educación y agricultura, con arquitecturas abiertas de hardware y software que garanticen auditabilidad, transparencia y control nacional. La segunda, escalar la formación de talento con certificaciones en IA ética y ciberseguridad, incluyendo *fine-tuning* de modelos libres, privacidad diferencial, cifrado homomórfico y defensa contra ataques adversariales; la meta es formar una masa crítica de especialistas, no solo operadores técnicos, sino investigadores capaces de cuestionar el impacto social de estas tecnologías. La tercera, en articular una red Sur-Sur no solo para intercambiar modelos, sino para desarrollar conjuntamente plataformas libres multilingües y corpus compartidos, especialmente para contextos periféricos. La cuarta, desarrollar proyectos sectoriales con tecnologías libres y difundirlos, acompañados siempre de reflexión crítica como vehículo para un debate del Sur Global que visibilice casos de éxito y alertas sobre peligros de la IA.

En definitiva, CENDITEL ha demostrado durante veinte años que puede sostener proyectos de tecnología libre con impacto nacional. El salto hacia la IA requiere ahora la misma lógica —desarrollo, investigación, apropiación y reflexión—, pero a una escala distinta. La hoja de ruta esbozada —infraestructura de datos, talento, alianzas Sur-Sur y proyectos sectoriales— constituye una vía concreta y escalable para que Venezuela deje de ser consumidora pasiva y se convierta en creadora activa de IA con identidad propia.

Conclusiones

El análisis desarrollado a lo largo de este artículo permite sostener una tesis central: la soberanía tecnológica en inteligencia artificial no es un problema exclusivamente técnico ni presupuestario, sino una cuestión política y epistémica que exige reconceptualizar el

papel de las instituciones públicas en la creación de conocimiento. A diferencia de lo que sugiere la lógica dominante, la soberanía en IA no se mide por la capacidad de competir en infraestructura de cómputo a gran escala, sino por la capacidad efectiva de decidir sobre los datos, los algoritmos, la infraestructura, el talento y el marco normativo que intervienen en el desarrollo y uso de estos sistemas. En ese marco, la inteligencia artificial libre —entendida como apertura del modelo, los pesos y el código— no es una versión empobrecida del modelo dominante, sino una ruta distinta con valor propio, basada en la adaptación de tecnologías abiertas, la formación de talento crítico y la construcción de redes de cooperación Sur-Sur.

Las experiencias del Sur Global examinadas en el primer apartado —Brasil, India, Sudáfrica, Marruecos y Arabia Saudita— muestran que no existe un único camino hacia la soberanía en IA, pero sí una constante: los países que avanzan combinan infraestructura, talento y normas propias. El caso venezolano, abordado en el segundo apartado, se inscribe en esa búsqueda con instrumentos concretos —el Ecosistema Digital Seguro, Canaima GNU/Linux, DeepRoot y el Banco Soberano de Datos—, aunque con una limitación señalada: la soberanía no se completa con el control del código y la interfaz, sino que exige infraestructura de cómputo propia para alojar modelos en territorio nacional.

De esa tesis se desprenden tres conclusiones que articulan el aporte del artículo. La primera es que la Seguridad de la Información en IA no puede reducirse al cumplimiento normativo. Ciertamente, la legislación —incluido el Código de Ética analizado en el tercer apartado— es necesaria pero insuficiente, porque la velocidad de la innovación tecnológica desborda permanentemente los límites normativos. Esto significa que la seguridad debe ser una práctica continua de auditoría técnica, verificación independiente y actualización permanente, no un sello que se obtiene una vez y se archiva. Por ello, la creación de capacidades endógenas de auditoría y red teaming —discutidas en el cuarto apartado— es más urgente que la aprobación de nuevas leyes.

La segunda conclusión es que el debate sobre la IA en Venezuela ha estado dominado por una lógica de adopción —cómo usar las tecnologías existentes— cuando lo que se requiere es una lógica de desarrollo crítico. Adoptar IA sin comprender sus implicaciones epistemológicas, sin auditar sus sesgos y sin controlar su infraestructura es reproducir la dependencia estructural que el propio Código de Ética busca superar. Aquí cobra sentido la soberanía cognitiva que la Introducción anuncia: no basta con controlar datos y cómputo si las comunidades no pueden comprender, cuestionar y decidir frente a sistemas que intervienen en sus procesos de pensamiento. La soberanía tecnológica no se decreta: se construye con investigación, publicación, debate y experimentación. En ese sentido, el aporte más valioso que puede hacer una institución como CENDITEL no es desarrollar aplicaciones, sino producir pensamiento crítico sobre las tecnologías disruptivas y ponerlo en circulación en el Sur Global.

La tercera conclusión, y quizás la más importante, es que el papel de CENDITEL debe redefinirse, tal como se planteó en el quinto apartado. Originalmente, la institución fue concebida para promover las tecnologías libres en un contexto en el que la prioridad

era la apropiación tecnológica. Hoy, ese contexto ha cambiado: la IA plantea desafíos que no existían cuando se fundó CENDITEL y que exigen un reenfoque de sus cuatro procesos fundacionales —desarrollo, investigación, apropiación y reflexión—. En el plano del desarrollo, CENDITEL debe ser el laboratorio nacional de auditoría de modelos de IA, capaz de verificar sesgos, evaluar riesgos y certificar estándares de seguridad. En el terreno de la investigación, le corresponde ejercer una prospectiva estratégica crítica: estudiar tendencias, anticipar escenarios y evaluar las implicaciones sociales, éticas y geopolíticas de las tecnologías emergentes. Desde la apropiación, debe ser el nodo venezolano de la red Sur-Sur en IA libre, conectando capacidades con otros países y traduciendo ese conocimiento en prácticas concretas. Y en el ámbito de la reflexión, debe ser un espacio multidimensional donde se publiquen y debatan los hallazgos, los riesgos y las alternativas de las tecnologías emergentes.

En definitiva, respondiendo al objetivo planteado al inicio, la construcción de una inteligencia artificial libre, ética, segura y con identidad nacional no es un proyecto tecnológico: es un proyecto civilizatorio. Lo que está en juego no es solo quién controla los algoritmos, sino qué tipo de sociedad queremos construir con ellos. En este contexto, Venezuela tiene la oportunidad histórica de demostrar que puede generar conocimiento de vanguardia, auditar sus propias tecnologías y contribuir al debate global desde una perspectiva propia. Pero esa oportunidad no se materializará por inercia: para lograrlo, se requiere decisión política, inversión sostenida y, sobre todo, una institución como CENDITEL que asuma con audacia su papel de conciencia crítica del Sur Global. El horizonte está abierto; la responsabilidad es nuestra.

Referencias

Abiade, S. (2025). Algorithmic sovereignty and the new security dependencies: How foreign AI surveillance technologies reshape domestic autonomy in the Global South. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, *27*(2), 162-180. https://journalwjarr.com/content/algorithmic-sovereignty-and-new-security-dependencies-how-foreign-ai-surveillance

Amado, N. (2025). *AI Sovereignty in Latin America: Regional Digital Dependence and the Potential to Overcome It* (Working Paper N.º 02/2025). RegulAIte. https://www.regulaite.eu/images/pdf/Amado2025.pdf

Anand, P., Garg, A., y Antony, A. (2025). Navigating the AI frontier: India's sovereign LLM quest. *India Business Law Journal*. https://law.asia/sovereign-llms-india/

AVN. (2025). Venezuela desarrolla 65 proyectos de IA para educación, economía y salud. https://avn.info.ve/venezuela-desarrolla-65-proyectos-de-ia-para-educacion-economia-y-salud/

Baladi, S. (2026). A phased implementation framework for the Moroccan digital–physical factory: From regional cloud hosting to national knowledge sovereignty. https://zenodo.org/records/20496255

Bentham, J. (1834). *Deontology, or, The science of morality: In which the harmony and co-incidence of duty and self-interest, virtue and felicity, prudence and benevolence, are explained and exemplified: From the MSS. of Jeremy Bentham* (J. Bowring, Ed.; Vol. 1). Longman, Rees, Orme, Browne, Green, Longman. https://archive.org/details/deontologyorthes01bentuoft

CENDITEL. (2026). *CENDITEL: Dos décadas de vanguardia en tecnologías libres. 2006-2026*. https://www.cenditel.gob.ve/portal/libros/

CNTI. (2026). Tecnología con propósito: actualización 8.4 de Canaima GNU/Linux Kavanayén integra aplicaciones con sello soberano. https://cnti.gob.ve/tecnologia-con-proposito-actualizacion-8-4-de-canaima-gnu-linux-kavanayen-integra-aplicaciones-son-sello-soberano/

Comité EIA LATAM. (2026). Manifiesto EIA. Ética de la IA Latam: Una perspectiva femenina en defensa de la dignidad y el futuro de la decisión humana. https://zenodo.org/records/21212138

COPE. (2026). El objetivo de Marruecos es dejar de ser la fábrica barata frente a Europa: El país quiere crecer en soberanía tecnológica e industrial [Audio]. https://www.cope.es/programas/lo-que-viene/audios/objetivo-marruecos-dejar-fabrica-barata-frente-europa-pais-quiere-crecer-soberania-tecnologica-e-industrial-20260906_3430788.html

Correo del Orinoco. (2026). Venezuela fortalece Ecosistema Digital Seguro para la soberanía tecnológica. https://www.correodelorinoco.gob.ve/venezuela-fortalece-ecosistema-digital-seguro-para-la-soberania-tecnologica/

De Melo, T. (2025). Large language models and free-software principles: Pathways to Brazilian digital sovereignty. *Anais do XXII Congresso Latino-Americano de Software Livre e Tecnologias Abertas (Latinoware 2025)*. https://sol.sbc.org.br/index.php/latinoware/

DeepRoot. (2025). *DeepRoot: Cliente de modelos avanzados de IA para GNU/Linux [Software]*. GitHub. https://github.com/jonasreyes/deeproot

Free Software Foundation. (2024). What is free software? https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.html

García, A., Puig, P., Iglesias, E., y Pérez, R. (2025). *Captando la oportunidad de los centros de datos en América Latina y el Caribe* (inf. téc.). Banco Interamericano de Desarrollo. https://doi.org/10.18235/0013774

Guerrero, R. (2026). Radiografía crítica del Plan Nacional de Inteligencia Artificial en México. *Noticiero Científico y Cultural Iberoamericano*. https://noticiasncc.com/plumas-ncc/rodolfo-guerrero/08/10/plumas-ncc-radiografia-critica-del-plan-nacional-de-inteligencia-artificial-en-mexico/

Humain. (2026). HUMAIN unveils HUMAIN M3: A frontier Arabic language model. https://www.humain.com/en/news/humain-unveils-humain-m3--a-frontier-arabic-language.html

IACHR. (2025). *The Impact of Digital Surveillance on Freedom of Expression in the Americas* (inf. téc.). Organization of American States. https://www.oas.org/en/iachr/expression/reports/VigilanciaRELECIDH.pdf

Johansson, G., Farias, V., y Gaspar, W. (2024). Brazil's Artificial Intelligence Plan (PBIA) of 2024: Enabler of AI sovereignty? *The African Journal of Information and*

Communication, (34). https://scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-72132024000200007

Martínez-Del Campo, J. (2026). Inteligencia artificial y desarrollo en economías emergentes: Un análisis del punto de partida de México y el imperativo de política pública. *Universitas XXI*, (44), 233-259. https://doi.org/10.17163/uni.n44.2026.09

Martins, D., y Tonini, A. (2025). Between sovereignty and efficiency: The Brazilian Artificial Intelligence Plan as a technical code. *Conjectura: Filosofia e Educação*, *30*, e025025. https://educa.fcc.org.br/scielo.php?pid=S2178-46122025000100104&script=sci_abstract&tlng=en

Martorell, P., y Porrúa, M. (2026). *Modelo de referencia para políticas de IA en el sector público de América Latina y el Caribe* (inf. téc.). Banco Interamericano de Desarrollo. https://publications.iadb.org/es/modelo-de-referencia-para-politicas-de-ia-en-el-sector-publico-de-america-latina-y-el-caribe

MINCYT. (2025). Venezuela avanza en materia de inteligencia artificial y ciberseguridad. https://mincyt.gob.ve/venezuela-avanza-en-materia-de-inteligencia-artificial-y-ciberseguridad/

MINCYT. (2026a). *Código de ética para el desarrollo y aplicación responsable de la inteligencia artificial* (inf. téc.). Ministerio del Poder Popular para Ciencia y Tecnología. https://mincyt.gob.ve/venezuela-presenta-el-codigo-de-etica-para-el-desarrollo-y-aplicacion-responsable-de-la-ia/

MINCYT. (2026b). Viceministro Raúl Hernández presenta avances para un desarrollo tecnológico soberano. https://mincyt.gob.ve/viceministro-raul-hernandez-presenta-avances-para-un-desarrollo-tecnologico-soberano/

MinHidrocarburos. (2026a). Banco soberano de datos de petróleo y gas. https://www.minhidrocarburos.gob.ve/entes-adscritos/banco-nacional-de-datos/

MinHidrocarburos. (2026b). Presidenta (E) inaugura Centro Tecnológico y de Gestión de Datos de Hidrocarburos. https://www.minhidrocarburos.gob.ve/presidenta-e-inaugura-centro-tecnologico-y-de-gestion-de-datos-de-hidrocarburos/

MTNRA. (2024). Outsourcing and Digital Export: Boost your success and unleash your potential. https://www.mmsp.gov.ma/sites/default/files/2024-09/BrochureOffreOutsourcing_20092024_Ang.pdf

OECD. (2026). *Competition in the age of AI: Initial evidence from microdata* (OECD Artificial Intelligence Papers N.º 62). OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/6f88a1ea-en

Ogoh, G., Eke, D., y Stahl, B. (2026). AI governance in North Africa: An ecosystems approach. *Science and Public Policy*, *53*(2), 258-276. https://doi.org/10.1093/scipol/scag007

Ollero, A. (2003). Deontología jurídica y derechos humanos. En *Ética de las profesiones jurídicas: Estudios sobre deontología* (pp. 53-72). UCAM-AEDOS. https://www.tribunalconstitucional.es/fr/tribunal/Composicion-Organizacion/documentos-magistrados/OlleroTassara/Colaboraciones/152-DEONTO.pdf

Onuchukwu, V., y Ohiro, O. (2026). Digital colonialism and algorithmic power: Data sovereignty and AI governance in the Global South. *AI, Law, Politics*, *2*(1), 30-51. https://alp-journal.com/index.php/journal/article/view/26

Open Source Initiative. (2024). The open source definition. https://opensource.org/osd

Palit, A., y Kaur, K. (2026). India's foundational artificial intelligence and large language model ambitions. *South Asia Scan*, (26). https://www.isas.nus.edu.sg/wp-content/uploads/2026/03/SouthAsiaScan-26_p3.pdf

PNUD. (2025). *Datos en la nube, centros en la tierra: El rol de los centros de datos en el futuro digital de ALC* (inf. téc.). Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). https://www.undp.org/es/latin-america/blog/datos-en-la-nube-centros-en-la-tierra-el-rol-de-los-centros-de-datos-en-el-futuro-digital-de-alc

Reuters. (2026). South Africa unveils draft AI policy, proposes new institutions and incentives. https://www.reuters.com/legal/litigation/south-africa-unveils-draft-ai-policy-proposes-new-institutions-incentives-2026-04-10/

Solar, J. (2021). Retos de la deontología de la abogacía en la era de la inteligencia artificial jurídica. *Derechos y Libertades*, (45), 123-161. https://doi.org/10.20318/dyl.2021.6104

Stanford HAI. (2026). *The 2026 AI Index Report* (inf. téc.). Stanford University. https://hai.stanford.edu/assets/files/ai_index_report_2026.pdf

UCT. (2025). UCT leads global conversation on AI safety, peace and security. *UCT News*. https://www.news.uct.ac.za/article/-2025-10-02-uct-leads-global-conversation-on-ai-safety-peace-and-security

UNCTAD. (2025). *Technology and innovation report 2025: Inclusive artificial intelligence for development (Chapter V: Global collaboration for inclusive and equitable AI)* (inf. téc.). United Nations Conference on Trade y Development. https://unctad.org/system/files/official-document/tir2025ch5_en.pdf

Zavazava, C. (2026). Opening remarks, Trustworthy GENIE.AI as an open source foundation for public sector GenAI [Speech]. https://www.itu.int/en/ITU-D/bdt-director/Pages/Speeches.aspx?ItemID=636

Zhang, S., y Chen, Z. (2026). The rise of "sovereign AI" in the Global South and China's cooperative responses. *Journal of International Security Studies*, (3), 104-132. https://cgaig.fudan.edu.cn/_upload/article/files/9f/d0/52ff094b48ef8bbbd50c4cd5182b/04de72b4-3561-4b91-9915-9f791fbf75d1.pdf

Construir la viabilidad del hardware científico abierto: Estudio de caso del microscopio OpenFlexure

Santiago Roca[1]

Introducción

La economía global ha puesto en evidencia las deficiencias de un modelo de desarrollo que depende de las dinámicas de los mercados internacionales, como las limitaciones de acceso a instrumentos de laboratorio, dispositivos, componentes y soporte técnico, las cuales representan obstáculos para la independencia tecnológica. En este escenario, la tecnología de código abierto aparece como una condición fundamental para la gestión de la investigación y la capacitación técnica en entornos de dependencia económica. La difusión de planos, programas y metodologías con licenciamiento abierto ofrece un camino hacia el desarrollo estratégico, porque fomenta la apropiación de conocimientos y, por tanto, la posibilidad de transitar de una posición de receptor de productos terminados a la formación de capacidades para generar tecnologías. No obstante, la disponibilidad de documentos no es suficiente por sí misma para asegurar la materialización de proyectos que contribuyan a apuntalar el sistema nacional de ciencia, tecnología e innovación.

El presente artículo explora el estudio de las condiciones de viabilidad del hardware científico abierto en el contexto del ecosistema nacional de innovación. Para ello se analizan, con fines exploratorios, los requisitos para la replicación del microscopio OpenFlexure Knapper et al. (2024), utilizando un enfoque metodológico que observa tanto la madurez técnica del proyecto como el conjunto de dimensiones que describen el contexto sociotécnico. Se parte de que la posibilidad de replicar un diseño abierto emerge de la interacción entre sus características técnicas y las capacidades materiales, institucionales y organizacionales presentes en el escenario (Lundvall, 2010; Rincón, 2025). Por lo tanto, la intención es trascender el formato de estudio de viabilidad tradicional para contribuir con una visión estratégica que sirva para el afianzamiento del hardware abierto en el país.

Para abordar este objetivo, se emplean dos herramientas teórico-metodológicas complementarias. En primer lugar, la Escala de Madurez de Tecnología Abierta (Mies et al., 2022), que permite evaluar el grado de preparación de un proyecto en términos de documentación y desarrollo técnico. En segundo lugar, se aplica el marco TELOS (Hall, 2007) para analizar las dimensiones técnicas, económicas, legales, operativas y de cronograma que pueden incidir en la adopción de proyectos de hardware abierto. Ambas herramientas pueden utilizarse de forma complementaria para estimar la disponibilidad

[1]Politólogo egresado de la Universidad de Los Andes (ULA), Especialista en Sistemología Interpretativa, Magíster en Ciencias Políticas y Doctor en Gestión para la Creación Intelectual. Investigador del Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL). Editor y autor de publicaciones académicas y de divulgación científica, y coordinador de proyectos de conocimiento y tecnologías libres. sroca@cenditel.gob.ve

y transferibilidad de un diseño. Para el desarrollo del ensayo, se examina la experiencia de transferencia de hardware abierto en Tanzania, con el fin de exponer algunas variables relevantes y respaldar la profundización de este tipo de estudios en el caso venezolano. En este contexto, la comparación entre casos permite identificar brechas y oportunidades para la consolidación de proyectos de hardware científico en el ecosistema de innovación.

El diseño metodológico adoptado es de carácter exploratorio y documental. El estudio se concentra en el microscopio OpenFlexure, un dispositivo de código abierto impreso en 3D que ha sido fabricado en varios países y cuenta con reconocimiento médico para el diagnóstico de la malaria (Collins et al., 2020; Organización Mundial de la Salud, 2024). Las fuentes de información incluyen artículos científicos, informes técnicos, repositorios y documentos de organismos internacionales. El análisis se estructura en dos momentos: la evaluación del nivel de madurez de OpenFlexure como indicador de preparación para ser replicado, y la aplicación del marco TELOS al caso de Tanzania, con el fin de identificar los requerimientos que pueden facilitar la recreación de un proyecto similar en Venezuela. Como resultado, se espera contribuir con la resolución de preguntas de fondo: ¿Qué indicadores permiten estimar la replicabilidad de un proyecto de hardware abierto? ¿Cómo ejecutar un diagnóstico de viabilidad de tecnologías libres? ¿Cómo utilizarlo para reforzar una hoja de ruta que garantice su implementación exitosa?

El artículo se articula de la siguiente manera: inicialmente, se introduce el concepto de hardware científico abierto y se describe el proyecto OpenFlexure. Luego se exponen las herramientas teórico-metodológicas de la investigación: la Escala de Madurez de Tecnología Abierta y el modelo TELOS. Estas herramientas se aplican de forma complementaria para determinar el nivel de integridad documental y tecnológica del microscopio OpenFlexure, así como para evaluar las condiciones deseables para su apropiación social. El contraste entre los resultados de este ensayo abre paso a una discusión sobre la distinción entre la disponibilidad de diseños abiertos y su transferibilidad, con miras a conceptualizar las iniciativas de desarrollo como políticas tecnológicas integrales. El texto concluye con un conjunto de reflexiones orientadas a contribuir con el fortalecimiento de la apropiación del hardware científico abierto en el ecosistema de innovación venezolano.

El hardware científico abierto y el caso de OpenFlexure

El concepto de hardware científico abierto se refiere a una práctica que traslada los principios del código abierto al diseño, fabricación y uso de instrumentos destinados a actividades como la investigación, la docencia y el diagnóstico médico. De acuerdo con la definición adoptada por la UNESCO (2020), el hardware científico abierto (*Open Science Hardware*) constituye una disciplina que busca hacer accesible, asequible y reproducible el equipamiento científico mediante la publicación de planos, listas de materiales, esquemas electrónicos y códigos de control, bajo licencias que permitan su uso, estudio, modificación y redistribución sin las restricciones del derecho de autor tradicional. Este enfoque se distingue del software libre en que mientras éste se distribuye mediante canales digitales, el hardware incorpora una dimensión material que exige componentes físicos, herramientas

de manufactura y procesos de ensamblaje, lo que introduce costos y exigencias logísticas específicas (Pearce, 2012).

A pesar de estas diferencias, el movimiento del hardware abierto ha logrado consolidar algunas iniciativas reconocidas globalmente. Proyectos como Arduino en el ámbito de la electrónica y RepRap en la fabricación han mostrado que es posible trasladar la filosofía del código abierto al mundo de los bienes materiales, mediante la liberación de la documentación de los diseños y la adopción de modelos de fabricación distribuida (Arancio, 2021; Lazalde et al., 2014). Estos casos colocaron en primer plano a los laboratorios comunitarios y los desarrolladores independientes como actores centrales de un ecosistema de innovación que no dependa de las cadenas de suministro foráneas. Este enfoque resulta pertinente en el ámbito científico, dado que los instrumentos de laboratorio, los equipos de diagnóstico médico y los dispositivos de enseñanza técnica suelen ser demasiado costosos para los países con limitaciones de importación.

La relevancia del hardware científico abierto para la independencia tecnológica reside en que ofrece la capacidad de reducir la dependencia de los proveedores externos. Si los planos, las listas de materiales y los procedimientos de ensamblaje son públicos, entonces las universidades, los centros de investigación y las comunidades técnicas pueden fabricar localmente los equipos, adaptarlos a necesidades concretas, y realizar tareas de mantenimiento sin requerir la intervención actores comerciales. Además, este modelo organiza los procesos de desarrollo en redes, a través de equipos distribuidos que equilibran la coordinación técnica y la gestión social, de forma que se mide su impacto observando los resultados técnicos y el beneficio comunitario (Guido y Versino, 2023). Tales capacidades constituyen una ventaja frente al hardware propietario, donde la asistencia técnica, los repuestos y las actualizaciones dependen de decisiones que ignoran las necesidades de las economías menos favorecidas.

El desarrollo de hardware abierto también está sujeto a criterios que pretenden garantizar las mejores prácticas. La *Open Source Hardware Association (s.f.)* detalla algunas recomendaciones para publicar proyectos de hardware y maximizar su replicabilidad: compartir los archivos de diseño en formatos accesibles, incluir el software para operar el dispositivo, ofrecer instrucciones claras y aplicar licencias libres a cada componente. También se enfatiza la importancia de alojar los proyectos en repositorios en línea para facilitar que la comunidad pueda seguir y colaborar con la evolución del diseño. Este propósito alcanza al hardware abierto para la salud, donde se hacen recomendaciones relevantes para la certificación, como definir el objetivo clínico, el entorno operativo adecuado (humedad, iluminación y bioseguridad), las limitaciones técnicas, los riesgos potenciales (fallos o falsos negativos), los requerimientos de capacitación y el uso de equipo de protección personal (Baskaran, 2026).

Ahora bien, la disponibilidad de diseños no parece suficiente para garantizar la transferencia, producción y apropiación social del hardware científico abierto, sino que se requiere la convergencia de múltiples actores, como redes de desarrolladores que trabajen

colaborativamente, unidades productivas que fabriquen los dispositivos y un Estado para proveer recursos financieros, infraestructura y políticas públicas (Bauwens et al., 2017). Las posibilidades de este modelo, que integra la gobernanza entre pares con la capacidad estatal, puede examinarse en el caso de proyectos como OpenFlexure, donde una coalición entre redes académicas, productivas y comunitarias se combinó para implementar tecnología médica de bajo costo en zonas de escasos recursos (Knapper et al., 2024).

El microscopio OpenFlexure (Figura 1) representa un caso de hardware científico abierto orientado a fomentar la independencia tecnológica. Se trata de un dispositivo diseñado para ser ensamblado en cualquier entorno que disponga de una impresora 3D y componentes electrónicos estándar (Collins et al., 2020). Su funcionamiento automático es gestionado por una Raspberry Pi que maneja la cámara y los motores paso a paso, y todo el diseño (mecánico, electrónico y software) se encuentra publicado bajo la Open Hardware License del *Conseil Européen para la Recherche Nucléaire* (CERN-OHL), que permite la fabricación y venta con la condición de que las modificaciones tengan la misma licencia (Knapper et al., 2024). El proyecto se originó en 2016 en las universidades de Bath y Cambridge, pero hoy día el microscopio se ha fabricado en más de sesenta países, con especial desarrollo en Tanzania, Kenia y Camerún, donde ha sido validado para el diagnóstico de malaria y el estudio de células cancerígenas. El reconocimiento del *MIT Solve Global Health Equity Challenge* (MIT Solve, 2024) y su inclusión en el compendio de tecnologías innovadoras de la OMS (Organización Mundial de la Salud, 2024), respaldan el potencial del dispositivo para ser adoptado en sistemas públicos de salud.



Figura 1: Microscopio OpenFlexure v. 7.
Fuente: OpenFlexure (2026b)

El proyecto contempla tres configuraciones de ensamblaje en función de los componentes disponibles: una versión de bajo costo (sin motores ni microordenador, utilizando una cámara web), una básica (con microordenador Raspberry Pi y cámara del mismo sistema) y una de alta resolución (que añade motores paso a paso y ópticas avanzadas) (Collins et al., 2020). Los distintos modelos de fabricación permiten ajustar el equipo a diferentes contextos; de forma que los dispositivos más económicos pueden construirse con fines educativos, mientras que los más complejos se destinan a actividades de diagnóstico e investigación. Así mismo, los usuarios disponen de varias alternativas de control del dispositivo, desde el manejo físico directo y el uso de lenguajes de programación como *Python* y *Blockly*, hasta la gestión mediante la interfaz gráfica *OpenFlexure Connect* (Knapper et al., 2024).

La evaluación de este proyecto resulta pertinente para Venezuela, considerando las dificultades para importar instrumental científico, equipos médicos y repuestos, pero también la posibilidad de impulsar las condiciones para la implementación de proyectos de hardware abierto que combinen las capacidades organizacionales y técnicas existentes en el país. Así mismo, el estudio de las experiencias de transferencia e implementación de desarrollos de hardware abierto puede ofrecer orientaciones para la construcción de condiciones de viabilidad en contextos con recursos económicos limitados.

Herramientas para el estudio de la viabilidad del hardware abierto

La evaluación de la viabilidad de proyectos de hardware científico abierto requiere un marco teórico-metodológico que supere enfoques convencionales, centrados estrictamente en el funcionamiento del prototipo o en el retorno financiero. A diferencia del software, cuya replicación depende del acceso a infraestructura de bajo costo, el hardware introduce desafíos derivados de su condición material, en cuanto que requiere componentes físicos, herramientas de manufactura, procesos de ensamblaje y logística de distribución, entre otros aspectos (Pearce, 2012). Por esta razón, la transferibilidad de un dispositivo no depende únicamente de la calidad del diseño, sino también de la accesibilidad de la documentación, la disponibilidad de insumos, las capacidades técnicas de los desarrolladores y el marco normativo que permite regular su uso. En este apartado, se presentan dos herramientas que permiten abordar estas dimensiones: la Escala de Madurez de la Tecnología Abierta y el marco TELOS adaptado a la replicación de hardware. La intención de recoger ambas herramientas es plantear un enfoque metodológico apropiado para evaluar diferentes alternativas de hardware abierto.

Escala de Madurez de Tecnología Abierta

La Escala de Madurez de Tecnología Abierta, propuesta por Mies et al. (2022), es un instrumento para calificar el grado de preparación de un diseño para ser replicado. A diferencia de los niveles de preparación tecnológica convencionales, que evalúan la madurez de una tecnología desde la idea hasta su despliegue comercial, las escalas de madurez incorporan dos dimensiones específicas: la calidad de la documentación compartida y la posibilidad de replicación del diseño.

La primera dimensión corresponde al Nivel de Preparación de Documentación Abierta (*Open Documentation Readiness Level*, ODRL). Esta escala mide la integridad y claridad de los archivos técnicos publicados bajo licencias libres. Comprende cuatro niveles, desde la publicación inicial de archivos de documentación (ODRL-1) y la entrega de archivos fuente en formatos editables (ODRL-2), hasta la documentación con estándares internacionales (ODRL-3) y la disponibilidad de manuales necesarios para la certificación comercial (ODRL-4). La importancia de esta escala es que una documentación deficiente es una barrera para la adopción de hardware abierto, ya que obliga a los desarrolladores a invertir tiempo y recursos en reconstruir información que debería estar disponible.

La segunda dimensión es el Nivel de Preparación de Tecnología Abierta (*Open Technology Readiness Level*, OTRL), que abarca seis etapas. Éstas van desde la conceptualización y la identificación de necesidades (OTRL-1), pasando por la definición de la arquitectura conceptual (OTRL-2), el modelado detallado (OTRL-3), la construcción y prueba de prototipos funcionales en entornos reales (OTRL-4), la optimización del diseño para procesos de manufactura (OTRL-5) y la obtención de certificaciones oficiales para su distribución en el mercado (OTRL-6). Esta escala permite determinar si un proyecto ha superado la fase de laboratorio y está listo para ser transferido a contextos productivos.

La reunión de ambas escalas ofrece una imagen integral de la madurez de un proyecto de hardware abierto. Un diseño puede alcanzar un alto nivel tecnológico y tener una documentación insuficiente, lo que dificultaría su replicación efectiva. Del mismo modo, una documentación completa no justificaría la adopción de un diseño que se encuentra en fase conceptual. Por lo tanto, la aplicación conjunta de ODRL y OTRL permite evaluar la transferibilidad de un proyecto como *OpenFlexure* a los sistemas de innovación, identificando las brechas que deben ser resueltas antes de intentar su implementación local.

Marco TELOS para la viabilidad de replicación de hardware abierto

El marco TELOS, originalmente desarrollado en el ámbito de la gestión de proyectos para evaluar la viabilidad de iniciativas tecnológicas (Hall, 2007), puede ser adaptado al contexto del hardware abierto para analizar las dimensiones que condicionan la replicación de un diseño (Sidik et al., 2025). En el caso del hardware abierto, el marco puede ser adaptado para evaluar la capacidad de una organización para reproducir, ensamblar y fomentar el escalamiento de un diseño a partir de la documentación disponible. Las cinco dimensiones que componen este marco son las siguientes:

Viabilidad técnica (T): Se centra en la calidad de la documentación y en la disponibilidad física de los materiales requeridos. Se verifica la integridad de los archivos fuente (esquemáticos, modelos CAD, código de control), la accesibilidad de la lista de materiales en términos de componentes estándar, la compatibilidad de los procesos de manufactura con las capacidades locales (impresión 3D, soldadura de componentes electrónicos) y la claridad de las guías de ensamblaje y calibración.

Viabilidad económica (E): Analiza los costos financieros asociados con la producción del prototipo. Incluye el presupuesto para la adquisición de componentes, las tarifas de

servicios de manufactura local, la inversión en herramientas específicas y el análisis de costo-beneficio, que compara el gasto de replicar localmente con el precio de importar un producto comercial o adquirir el kit ensamblado.

Viabilidad legal (L): Garantiza que la reproducción del hardware no vulnere derechos de propiedad intelectual ni normativas locales. Se revisan los términos de la licencia abierta para confirmar que permite los usos previstos, especialmente si existe intención comercial. Además, se evalúa el cumplimiento de las regulaciones técnicas y sanitarias del país receptor (certificaciones de dispositivos médicos, permisos de distribución).

Viabilidad operacional (O): Determina si el equipo humano y la infraestructura local poseen las capacidades necesarias para mantener el hardware funcionando a largo plazo. Evalúa la compatibilidad entre la complejidad del montaje y las habilidades técnicas del personal, la existencia de procedimientos de control de calidad, y la capacidad de ofrecer mantenimiento y suministrar repuestos a los usuarios finales.

Viabilidad de cronograma (S): Establece si el proyecto de replicación puede completarse dentro del tiempo requerido. A diferencia del software, el hardware está sujeto a los plazos de la cadena de suministros, por lo que se deben calcular los tiempos de espera para la importación de partes, la fabricación de componentes y la recepción de materiales. El cronograma debe contemplar las horas necesarias para el ensamblaje manual y las pruebas.

La aplicación sistemática de estas cinco dimensiones en el caso de *OpenFlexure* puede ayudar a identificar los requerimientos para implementar un proyecto de hardware científico abierto en un ecosistema de ciencia, tecnología e innovación. En ese sentido, el enfoque planteado tiene como finalidad señalar las condiciones que pueden favorecer la replicación de proyectos de hardware científico abierto en el país.

Evaluación de la madurez del microscopio OpenFlexure

Antes de examinar las condiciones que facilitan u obstaculizan la implementación de un proyecto de hardware abierto en Venezuela, resulta imprescindible determinar el grado de preparación del propio dispositivo que se pretende replicar. La Escala de Madurez de Tecnología Abierta, presentada en el apartado anterior, permite realizar esta evaluación de forma sistemática. A continuación, se aplican las dos dimensiones de la escala para determinar el nivel de preparación del microscopio OpenFlexure.

Nivel de Preparación de Documentación Abierta

La documentación del proyecto *OpenFlexure* se encuentra alojada en repositorios públicos accesibles a través de GitLab, plataforma que centraliza los archivos de diseño mecánico, los esquemáticos electrónicos, el código de control y las guías de ensamblaje (OpenFlexure, 2024). Los archivos fuente se distribuyen en formatos editables, dado que los modelos CAD permiten modificaciones, los esquemáticos de la placa controladora están disponibles y el código de los microcontroladores se publica bajo licencia GNU Affero

General Public License (Knapper et al., 2024). Esta disponibilidad de fuentes sitúa al proyecto en un nivel ODRL-2, ya que los desarrolladores pueden descargar los archivos y adaptarlos a sus necesidades específicas.

El proyecto llega a nivel ODRL-3, dado que incorpora una plataforma colaborativa que unifica las instrucciones de ensamblaje para gestionar múltiples variantes del microscopio (alta resolución, básica y de bajo costo). Los manuales incluyen listas de materiales detalladas, diagramas de cableado paso a paso y procedimientos de calibración óptica (OpenFlexure, 2026a, 2026b). La documentación sigue estándares internacionales de hardware abierto, como la especificación de la lista de materiales con referencias de componentes y números de pieza. No obstante, el proyecto no ha alcanzado el nivel ODRL-4, el cual requiere manuales específicos para la certificación médica. Los desarrolladores reconocen que la documentación actual, si bien suficiente para la fabricación de prototipos de investigación, necesita ser ampliada y estandarizada para cumplir con los requisitos de las agencias sanitarias (Knapper et al., 2024; Stirling, 2025).

Nivel de Preparación de Tecnología Abierta

En cuanto a la madurez tecnológica, el microscopio *OpenFlexure* ha superado la fase de conceptualización. El proyecto se originó como una investigación académica de las universidades de Bath y Cambridge, donde se definió la arquitectura conceptual de un dispositivo de microscopía de bajo costo basado en impresión 3D (OTRL-1 y OTRL-2). Posteriormente, se realizó el modelado de las piezas mecánicas y el diseño de la electrónica de control (OTRL-3), lo que permitió construir los primeros prototipos funcionales (Collins et al., 2020; Sharkey et al., 2016).

El proyecto alcanzó el nivel OTRL-4 al demostrar el funcionamiento óptimo del dispositivo en entornos reales. En Tanzania se han fabricado más de 100 microscopios, los cuales han sido utilizados en centros de salud para el diagnóstico de malaria, así como en instituciones educativas para la realización de actividades didácticas (Collins et al., 2020; Knapper et al., 2024). Las pruebas de campo han validado la capacidad del sistema para escanear muestras biológicas mediante algoritmos de autocalibración, y los resultados han sido publicados en revistas con revisión por pares. Este nivel determina que el dispositivo funciona en condiciones de campo con usuarios reales.

El OTRL-5, que consiste en la optimización del diseño para procesos de manufactura, ha sido abordado por los nodos locales del proyecto. La empresa social *Bongo Tech and Research Labs* (BTech) en Tanzania desarrolló adaptaciones del diseño, incluyendo carcasas optimizadas y una variante controlada mediante joysticks (OpenFlexure, 2022c). Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la variabilidad en la calidad de impresión 3D y la necesidad de rutinas de calibración, las cuales deben ser realizadas por personal entrenado (Knapper et al., 2024).

En cuanto al OTRL-6 (certificación oficial para distribución comercial), el proyecto ha avanzado parcialmente. BTech está registrada como fabricante de dispositivos médicos ante

la autoridad sanitaria, y sus unidades específicas son sometidas a controles de calidad, aunque falta la certificación que permite la comercialización internacional (Stirling, 2025).

La evaluación de ambas escalas revela que *OpenFlexure* se encuentra en una fase avanzada de madurez, aunque hay aspectos que requieren atención. El nivel ODRL-3 indica que la documentación es suficiente para que un equipo técnico con experiencia pueda replicar el dispositivo, siempre que se cuente con acceso a los componentes y las herramientas de fabricación. La ausencia del nivel ODRL-4 implica que la certificación para uso médico demanda un trabajo adicional de estandarización de manuales, así como la adaptación a los requisitos regulatorios de cada país.

En la dimensión tecnológica, el nivel OTRL-4 es un indicador de que el dispositivo funciona en condiciones reales. No obstante, el paso al OTRL-5 requiere que cada nodo local realice ajustes en el diseño original para adaptarlo a sus capacidades de manufactura y a la disponibilidad de componentes. La experiencia de BTech en Tanzania sugiere que esta optimización es factible, pero exige cubrir capacidades técnicas de diseño e ingeniería. El OTRL-6 representa el mayor desafío para proyectos de hardware abierto con fines médicos, ya que los procesos de certificación están diseñados para productos comerciales y no para esquemas de fabricación distribuida.

En suma, la aplicación de las escalas de madurez permite señalar que *OpenFlexure* es un proyecto que podría ser transferido con salvedades. Su adopción en un país como Venezuela no se reduciría a descargar los archivos e imprimir las piezas; sino que se requeriría un trabajo de adaptación de diseño y adecuación documental, optimización de manufactura local, y construcción de capacidades técnicas e institucionales que permitan cerrar la brecha entre el nivel del proyecto y los requisitos operativos. La siguiente sección abordará, mediante el marco TELOS, cómo esas condiciones se observaron en Tanzania y qué repercusiones puede tener ese precedente para Venezuela.

Análisis de viabilidad de OpenFlexure a través del marco TELOS

Para profundizar en la comprensión de las condiciones que facilitan u obstaculizan la adopción de tecnología en contextos específicos, resulta necesario realizar un análisis que contemple dimensiones que vayan más allá de la calidad del diseño y la documentación, en cuanto que, como se ha señalado, la disponibilidad de esta información equivale a la transferibilidad del proyecto. El marco TELOS, adaptado a la replicación de hardware abierto, ofrece esa posibilidad al examinar las facetas técnica, económica, legal, operacional y de cronograma que inciden en el éxito de un proyecto. En esta sección se aplica al caso de Tanzania, con el fin de identificar algunas de las cuestiones que deben ser atendidas para construir una hoja de ruta de apropiación tecnológica en Venezuela.

Viabilidad técnica

La viabilidad técnica de replicación de un proyecto de hardware abierto se refiere a la capacidad de un actor local para acceder a la documentación, disponer de los componentes

y ejecutar los procesos de manufactura. En Tanzania, este requisito fue satisfecho mediante una combinación de recursos internacionales y capacidades locales emergentes. Los archivos de diseño y las listas de materiales fueron descargados del repositorio global de *OpenFlexure*, el cual proporciona modelos CAD en formatos editables y esquemáticos electrónicos completos (OpenFlexure, 2024). La organización BTech contó con impresoras 3D capaces de trabajar con filamento PLA, así como con herramientas de electrónica y soldadura de precisión. Los componentes críticos (Raspberry Pi, motores paso a paso 28BYJ-48, placas controladoras y sistemas ópticos) fueron donados por la *Humanitarian Technology Trust* y posteriormente adquiridos mediante fondos del gobierno (Knapper et al., 2024). Un aspecto destacado fue la capacidad de BTech para adaptar el diseño original a las condiciones locales (OpenFlexure, 2022c), lo que requirió personal con competencias en impresión 3D, soldadura electrónica y calibración óptica, habilidades que fueron desarrolladas mediante formación continua y colaboración con las universidades británicas.

En Venezuela existen diferentes aspectos favorables: la documentación de *OpenFlexure* es pública y accesible, y el país cuenta con una infraestructura de laboratorios de fabricación digital en algunas universidades y centros de investigación, así como con una comunidad de desarrolladores de software y hardware libre organizada en torno a proyectos como Canaima GNU/Linux. Sin embargo, también es necesario salvar brechas significativas. La disponibilidad de componentes como Raspberry Pi, motores paso a paso y sistemas ópticos depende de condiciones de importación de bienes tecnológicos. Así mismo, es necesario contar con datos sobre la capacidad de impresión 3D y la formación de personal técnico en calibración óptica y electrónica de precisión. Por lo tanto, es importante asegurar la presencia de actores que puedan incorporarse en la ejecución de una experiencia piloto, con el fin de ensayar soluciones prácticas a problemas de diseño, sustitución de componentes y fabricación *in situ*.

Algunas preguntas importantes para reforzar un eventual diagnóstico, son: ¿Cuántas impresoras 3D operativas existen en los centros de investigación del país y con qué materiales pueden trabajar? ¿Qué proveedores locales o regionales pueden suministrar componentes electrónicos como Raspberry Pi o motores paso a paso? ¿Qué diseño puede reemplazar la dependencia de componentes críticos? ¿Existen programas de formación en fabricación digital y electrónica que puedan articularse con el proyecto?

Viabilidad económica

La viabilidad económica evalúa los costos financieros de producir el hardware localmente, la inversión en herramientas y la comparación con alternativas comerciales. En Tanzania, la experiencia de BTech demostró que la fabricación local es económicamente viable bajo ciertas condiciones. Los costos de producción locales de cada microscopio se estiman entre 200 y 400 euros, significativamente inferiores al precio de equipos comerciales equivalentes que superan los 2.000 euros (Collins et al., 2020; Knapper et al., 2024). La inversión inicial en herramientas (impresoras 3D, estaciones de soldadura, equipos de calibración) fue financiada mediante una combinación de donaciones internacionales y asignaciones del presupuesto nacional de salud. El modelo de negocio adoptado por BTech combina la venta

de kits de construcción con la prestación de servicios de mantenimiento y capacitación, generando ingresos que se reinvierten en el proyecto (OpenFlexure, 2022a). Un elemento central del análisis económico fue la comparación costo-beneficio, que determinó que el ahorro acumulado por la fabricación local frente a la importación de microscopios justificó la inversión pública, siguiendo el modelo de retorno de inversión propuesto por Pearce (2016).

En Venezuela, la viabilidad económica requiere un análisis que considere las condiciones particulares del mercado local. Por ejemplo, es necesario obtener datos sobre el costo de importación de microscopios comerciales y los precios de componentes electrónicos. Las restricciones de importación encarecen los bienes tecnológicos lo que, en contraste, mejora el beneficio relativo de la fabricación frente a la importación. En cuanto a las fuentes de financiamiento, la inversión inicial en herramientas y componentes podría ser ejecutada con fondos del sistema nacional de ciencia, tecnología e innovación (Asamblea Nacional de la República Bolivariana de Venezuela, 2022). Para completar el diagnóstico, sería necesario responder preguntas como las siguientes: ¿Cuál es el costo real de importar un microscopio de laboratorio estándar o un kit de *OpenFlexure* ensamblado? ¿Qué proveedores locales ofrecen servicios de impresión 3D y ensamblaje electrónico y a qué precios operan? ¿Cuál sería el retorno de la inversión pública en términos de ahorro acumulado y unidades producidas?

Viabilidad legal

La viabilidad legal de replicación garantiza que la reproducción del hardware no vulnere derechos de propiedad intelectual ni normativas locales. En Tanzania, el proyecto se desenvolvió en un entorno normativo de dos niveles. A nivel global, la licencia CERN-OHL-S (*Open Hardware License* del CERN, versión *Strongly Reciprocal*) permite a cualquier persona fabricar, usar y vender el dispositivo, pero obliga a publicar el código fuente de las mejoras bajo las mismas condiciones (Knapper et al., 2024). Esta cláusula de reciprocidad asegura que las adaptaciones locales retornen al repositorio común. A nivel nacional, BTech obtuvo el registro como fabricante de dispositivos médicos ante la autoridad sanitaria de Tanzania, un requisito necesario para que los microscopios pudieran ser utilizados en el diagnóstico clínico de malaria (Stirling, 2025). Así mismo, como parte del entramado legal, la *Public Procurement Act* fomenta la adquisición de hardware abierto, lo que facilitó la incorporación del dispositivo en el catálogo de compras públicas del sistema de salud.

En Venezuela, el ordenamiento jurídico presenta una base normativa que resulta favorable para el hardware científico abierto. La Ley Orgánica de Ciencia, Tecnología e Innovación (LOCTI) declara las actividades científicas y tecnológicas de interés público, y reconoce como sujetos de ley a instituciones públicas, comunas y organizaciones sociales (Asamblea Nacional de la República Bolivariana de Venezuela, 2022). La Ley de Infogobierno impone a la administración pública la utilización preferente de software libre y estándares abiertos, y obliga a publicar los desarrollos financiados con fondos públicos bajo licencias libres (Asamblea Nacional de la República Bolivariana de Venezuela, 2013). La Resolución de Ciencia Abierta añade un marco para la promoción de iniciativas colaborativas en materia de hardware científico (Ministerio del Poder Popular para Ciencia y Tecnología, 2023). No obstante, también existen vacíos significativos, como por ejemplo que el país carece de

un marco específico para la certificación de dispositivos médicos construidos con diseños abiertos. Para avanzar en el diagnóstico, es necesario responder: ¿La licencia CERN-OHL-S es plenamente compatible con el ordenamiento jurídico venezolano? ¿Qué requisitos debe cumplir un fabricante local de dispositivos médicos ante la autoridad sanitaria? ¿Qué opciones existen para integrar dispositivos abiertos en planes de compras públicas?

Viabilidad operacional

La viabilidad operacional determina si el equipo humano y la infraestructura local poseen capacidades para mantener el hardware funcionando a largo plazo. En Tanzania, este aspecto fue abordado mediante un programa de formación continua que involucró a técnicos de BTech, personal de salud de dispensarios rurales e investigadores de la Universidad de Dar es Salaam (Knapper et al., 2024). Los procedimientos de control de calidad incluyen la verificación de la precisión del movimiento de la platina, la calibración del sistema óptico y la validación de las imágenes capturadas mediante algoritmos estándar (OpenFlexure, 2022b). La sostenibilidad local se garantizó mediante la capacidad de BTech para ofrecer mantenimiento, reparar averías (incluyendo reimpresión de piezas dañadas) y suministrar repuestos, lo que reduce la dependencia de los centros de desarrollo externos (The GIST, 2025).

En Venezuela, la viabilidad operacional representa uno de los retos más significativos, pero también una oportunidad para fortalecer las capacidades locales. El país cuenta con universidades públicas que imparten carreras en ingeniería biomédica, electrónica y mecánica, cuyos estudiantes y egresados pueden constituir el núcleo técnico del proyecto. Así mismo, existen centros de investigación y empresas sociales con conocimiento y experiencia en fabricación digital, software y hardware abierto. Sin embargo, se requieren datos sistematizados sobre el número de técnicos capacitados en calibración óptica, soldadura electrónica de precisión o programación de sistemas embebidos. Las preguntas pendientes incluyen: ¿Qué universidades o institutos técnicos pueden formar parte de una red nacional de capacitación en hardware abierto? ¿Existen laboratorios de fabricación digital con equipamiento operativo que puedan ser utilizados como nodos de producción? ¿Qué protocolos de control de calidad serían necesarios desarrollar para asegurar la fiabilidad de los microscopios fabricados localmente? ¿Cómo incorporar estos elementos en la ejecución de una experiencia piloto de nivel nacional?

Viabilidad de cronograma

La viabilidad de cronograma establece si el proyecto de replicación puede completarse en el tiempo requerido. En Tanzania, el cronograma de implementación se estructuró en fases progresivas (Knapper et al., 2021; Stirling, 2025). Una primera fase incluyó la adquisición de impresoras 3D y componentes, la formación de técnicos y la producción de los primeros prototipos funcionales. Una segunda fase comprendió la optimización del diseño para manufactura local, la realización de pruebas de campo en centros de salud y la obtención del registro como fabricante de dispositivos médicos. Una tercera fase, aún en curso, está dedicada a la certificación clínica y al escalamiento de la producción para

atender la demanda del sistema público de salud. Los nodos críticos fueron los tiempos de espera para la importación de componentes electrónicos y la necesidad de iteraciones en el diseño para resolver problemas de calibración detectados en las pruebas de campo.

En Venezuela, la elaboración de un cronograma realista enfrenta requerimientos concretos. El tiempo de los plazos de importación puede verse afectado por restricciones aduaneras. Así mismo, es necesario tener datos sobre los tiempos de respuesta de proveedores locales de impresión 3D y ensamblaje electrónico. Algunas preguntas que es necesario responder incluyen: ¿Cuánto tiempo tomaría importar un lote de componentes críticos desde proveedores internacionales? ¿Existen proveedores regionales que puedan ofrecer plazos más cortos? ¿Qué tiempo requeriría la formación de un primer grupo de técnicos en ensamblaje y calibración? ¿Cuál sería el margen de oportunidad para desplegar el dispositivo en el sistema de salud, considerando las prioridades sanitarias del país?

La aplicación del marco TELOS permite orientar la identificación de brechas y oportunidades en diferentes contextos. No obstante, se trata de adoptar los referentes conceptuales y metodológicos que permitan realizar una aproximación a la realidad de cada región, evitando considerar cualquier caso como ejemplo universal. En Tanzania, la viabilidad fue construida mediante una combinación de donaciones internacionales, capacidades técnicas locales, un marco normativo acorde y una articulación efectiva entre comunidad global, empresa social y Estado. En Venezuela, el diagnóstico preliminar sugiere que, si bien existen condiciones jurídicas favorables y una base de capacidades técnicas en constante evolución, las principales brechas se concentran en la disponibilidad de componentes, la certificación médica y los plazos de importación. No obstante, es necesario reconocer que existe una base técnica y organizacional propicia para la articulación de esfuerzos alrededor de este tipo de proyectos.

Este estudio ha permitido explorar los requisitos para canalizar la transferencia de proyectos en cualquier contexto. El trayecto recorrido expone que la construcción de la viabilidad de un diseño es un proceso sociotécnico que involucra múltiples actores y dimensiones. Para las instituciones públicas, el reto va más allá de evaluar la transferibilidad del diseño, y abarca la posibilidad de articularse para incrementar las oportunidades de fortalecimiento de los proyectos de hardware abierto. La siguiente sección recoge los resultados del análisis con miras a contribuir con ese propósito.

Discusión: Disponibilidad y transferibilidad del hardware científico abierto

Es necesario distinguir entre la viabilidad de un prototipo como atributo intrínseco y como construcción sociotécnica que depende de la interacción entre diferentes componentes del ecosistema. En el caso examinado, la aplicación de la Escala de Madurez de Tecnología Abierta al microscopio *OpenFlexure* muestra el nivel de avance de la documentación y la tecnología como indicadores de la integridad del proyecto. Sin embargo, la disponibilidad de documentación y la prueba en entornos reales no garantizan por sí mismos que sea posible

fabricarlo, certificarlo y sostenerlo en cualquier contexto. En ese sentido, la aplicación del marco TELOS respalda que la viabilidad es una construcción que depende de diferentes dimensiones, como la articulación de comunidades técnicas, empresas sociales y el sector público (Guido y Versino, 2023; Rincón, 2025). Por lo tanto, resulta necesario señalar las condiciones para que un proyecto abierto sea transferible, con el fin de fundamentar estrategias que incorporen a diferentes actores en la apropiación social del hardware científico abierto.

Para diferenciar entre "accesibilidad" y "transferibilidad" es necesario distinguir tres niveles. La documentación, como se explicó, identifica la disponibilidad de archivos, manuales, licencias y listas de materiales que componen un proyecto. La capacidad de operación abarca el conocimiento tácito, la infraestructura, el acceso a componentes y el financiamiento, entre otros aspectos. Pero la apropiación incluye la adaptación, la producción, la certificación, el mantenimiento y la gobernanza del proyecto. Por ejemplo, se puede disponer de los planos y no contar con capacidad de fabricación, o tenerla pero no asegurar las posibilidades de certificar o de sostener un producto en el tiempo. Como caso de estudio, un microscopio abierto puede presentarse como candidato de apropiación, pero deben existir condiciones técnicas y sociales para la producción y el escalamiento del diseño.

Por lo tanto, la apropiación de un proyecto de hardware científico abierto debe abordarse desde un enfoque multidimensional con el propósito de fomentar su incorporación en un sistema de innovación (Lundvall, 2010). En el caso estudiado, la incorporación de componentes importados puede reforzar la dependencia de proveedores externos que se desea combatir. Así mismo, la certificación puede conformar una barrera que requiere acciones como ensayos clínicos, control de calidad y marcos regulatorios. Aspectos como éstos se convertirían en nodos críticos para el éxito de un proyecto porque, desde el punto de vista de la gestión tecnológica, no se trata solo de reproducir un diseño, sino también de garantizar su escalamiento en un ecosistema de producción local-global. Por lo tanto, la conformación de una comunidad de fabricación distribuida exige observar las condiciones del contexto para fortalecer una hoja de ruta que promueva el afianzamiento del proyecto.

El caso de BTech en Tanzania contribuye a ilustrar este escenario. Dicha organización se ha mantenido con condiciones específicas, como donaciones internacionales, demanda institucional y formación de capacidades técnicas. También opera con un modelo de negocio compuesto, ya que ofrece kits de construcción, presta servicios de mantenimiento y participa en la formación técnica. Estos aspectos pueden ser relevantes para la conformación de una red de desarrollo de hardware científico abierto, pero sería necesario realizar un diseño organizacional adecuado al contexto local. En el caso venezolano, la convergencia entre diferentes instrumentos normativos fomenta la inversión pública en proyectos de hardware abierto, a lo que se suman comunidades organizadas en torno al software y el hardware libre, así como laboratorios de fabricación digital en universidades y centros de investigación. Esta base puede orientarse hacia el hardware científico en la medida en que se diseñen mecanismos institucionales para garantizar la articulación entre los diferentes actores.

El estudio del contexto también ofrece información sobre algunas de las brechas. La lista de materiales incluye componentes que enfrentan dificultades de importación y puede generar problemas en el proyecto. También se debe responder si un microscopio de licencia abierta puede certificarse para uso clínico y no solo con fines educativos. El primer obstáculo podría mitigarse con acciones para adaptar el diseño y sustituir componentes, con el fin de ofrecer una versión del prototipo adaptada a las capacidades locales. En cuanto al segundo problema, sería necesario considerar qué formas de certificación pueden implementarse o crearse para facilitar la adquisición, uso y distribución local del dispositivo. La atención de estos aspectos formaría parte de una agenda de construcción de viabilidad de proyectos fundamentada en estudios como el presentado en este trabajo.

De este modo, se estaría abordando la transferencia del proyecto no solo como una experiencia de desarrollo en sentido restringido, sino también como una política integral dirigida a fortalecer el ecosistema de innovación. Una estrategia podría consistir en ejecutar una experiencia piloto con nodos técnicos y una red de soporte institucional, orientada a adaptar y fabricar el dispositivo localmente, con el fin de generar respuestas a las condiciones presentes en el entorno. El objetivo sería consolidar al menos dos nodos de fabricación para adaptar y ensamblar los primeros prototipos funcionales, contando con la incorporación de fondos públicos y alternativas de cooperación nacional e internacional. Así, podrían atenderse diferentes aspectos de la viabilidad del proyecto, considerada de forma integral como política y no solo como requisito de fabricación.

Conclusiones: Construir la viabilidad del hardware abierto como política tecnológica

Este artículo analizó las condiciones de viabilidad del hardware científico abierto en el contexto del ecosistema de innovación, tomando como caso el microscopio *OpenFlexure*. El recorrido permite sostener que la viabilidad es una construcción sociotécnica que depende de la interacción entre la calidad del proyecto y las capacidades materiales, institucionales y organizacionales del contexto. La aplicación de las escalas de madurez de la tecnología y del marco TELOS permitió ensayar la utilización de dos herramientas que evalúan la disponibilidad y la apropiabilidad de un prototipo de hardware científico abierto, como parte de un diagnóstico que permite examinar tanto la integridad de la tecnología como los requerimientos de su incorporación a un ecosistema tecnológico.

En este sentido, el aporte del trabajo puede formularse de la siguiente manera. Por una parte, se propuso un esquema que combina la Escala de Madurez de Tecnología Abierta, la cual evalúa la integridad de una tecnología; y el marco TELOS, que ordena las dimensiones técnica, económica, legal, operacional y temporal del proyecto. Esta aproximación permite observar no solo las condiciones de accesibilidad de un prototipo, sino también los requerimientos de transferencia del proyecto, con énfasis en las capacidades locales de producción. Dicho esquema ofrece una guía para la toma de decisiones que se separa de la evaluación técnico-económica convencional. No la descarta, sino que reconoce que la viabilidad es una condición que va más allá de la disponibilidad del diseño y apunta

hacia el reconocimiento del hardware científico como política de innovación.

Si bien se partió de un caso de estudio, el trabajo no pretende comparar mecánicamente dos experiencias surgidas en contextos diferentes para extrapolar una lista de recomendaciones. Al contrario, se busca fundamentar la complementariedad que existe entre las dimensiones técnica y social del desarrollo y apropiación del hardware abierto. La documentación, la capacidad de operaciones y la transferibilidad son dimensiones que representan las condiciones de apropiación en un entorno tecnológico. Así, aspectos como el licenciamiento y la certificación, la conformación de redes de desarrollo y el papel habilitante de los entes públicos, son expuestos como requerimientos a cumplir para pasar de la reproducción de prototipos a una política integral de apropiación tecnológica.

Este enfoque también contribuye a informar la toma de decisiones en una escala que abarca desde el marco de gobernanza hasta la gestión de proyectos. Si un modelo incorpora componentes costosos o escasos, puede plantearse cambios de diseño con el fin de adaptarlo a las condiciones locales. Cada decisión contribuye a configurar hojas de ruta que incluyan desde la adquisición de kits terminados, pasando por la adaptación local hasta la contratación de proveedores externos. Como resultado, la disponibilidad del diseño se convierte en un activo para la recreación de experiencias de desarrollo, más que en un impedimento para la replicación. En ese sentido, el enfoque presentado presta atención a aspectos que podrían causar que, incluso un prototipo bien adaptado, pueda no convertirse en un proyecto con impacto real.

Pasar de la evaluación de la viabilidad a la construcción de condiciones para que un proyecto sea viable representa una cuestión de política tecnológica. El enfoque multidimensional permite afirmar que las iniciativas técnicas y económicas deben ser respaldadas por propuestas políticas, jurídicas y organizacionales, en cuanto que se depende de la capacidad de los actores para articularse en torno a proyectos complejos. Por lo tanto, una aproximación integral representa un aporte para responder cuestiones relacionadas con el diagnóstico situacional, la replicabilidad de diseños y la conformación de una agenda de apropiación social de hardware abierto.

Referencias

Arancio, J. (2021). *Fabricaciones desde el diálogo: hardware científico abierto y democratización de la producción de conocimiento en la 'periferia'* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Quilmes]. https://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/3109

Asamblea Nacional de la República Bolivariana de Venezuela. (2013). Ley de Infogobierno.

Asamblea Nacional de la República Bolivariana de Venezuela. (2022). Ley Orgánica de Reforma Parcial del Decreto con Rango, Valor y Fuerza de Ley Orgánica de Ciencia, Tecnología e Innovación.

Baskaran, A. (2026). *Best practices for source of Open Healthware designs*. Open Source Hardware Association (OSHWA). https://oshwa.org/announcements/best-practices-for-source-of-open-healthware-designs/

Bauwens, M., Kostakis, V., Troncoso, S., y Utratel, A. M. (2017). *Transición hacia el procomún y P2P: Guía básica*. P2P Foundation; Transnational Institute. https://www.tni.org/files/publication-downloads/transicion_hacia_el_procomun_y_p2p_guia_basica.pdf

Collins, J., Knapper, J., Stirling, J., Mduda, J., Mkindi, C., Mayagaya, V., Mwakajinga, G., Nyakyi, P., Sanga, V., Carbery, D., White, L., Dale, S., Lim, Z., Baumberg, J., Cicuta, P., McDermott, S., Vodenicharski, B., y Bowman, R. (2020). Robotic microscopy for everyone: The OpenFlexure microscope. *Biomedical Optics Express*, *11*(5), 2447-2460. https://doi.org/10.1364/BOE.385729

Guido, L., y Versino, M. (2023). Producción de conocimientos tecnológicos en red a partir del análisis del desarrollo de hardware libre en Argentina. *Pampa*, (28), e0073. https://doi.org/10.14409/pampa.2023.28.e0073

Hall, J. A. (2007). *Accounting information systems* (8.ª ed.). Cengage Learning.

Knapper, J., Stirling, J., Collins, J., McDermott, S., Sanga, V., Nyakyi, P., Anyelwisye, G., Austic, G., Wadsworth, W., Mkindi, C., y Bowman, R. (2021). Transitioning from academic innovation to viable humanitarian technology: The next steps for the OpenFlexure project. En M. Cunningham y P. Cunningham (Eds.), *2021 IST-Africa Conference*. IEEE. https://purehost.bath.ac.uk/ws/files/227385400/ISTAfrica_Paper_ref_110_11689_2_.pdf

Knapper, J., Whiteford, F., Rosen, D., Wadsworth, W., Stirling, J., Mkindi, C., Mduda, J., Sanga, V., Nyakyi, P., Mboa, T., Jafsia, E., Fadanka, S., Hummel, K., Anandasabapathy, S., y Bowman, R. (2024). Developing the OpenFlexure microscope towards medical use: Technical and social challenges of developing globally accessible hardware for healthcare. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *382*(2274), 20230257. https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0257

Lazalde, A., Torres, J., y Vila-Viñas, D. (2014). Hardware: Ecosistemas de innovación y producción basados en hardware libre. En D. Vila-Viñas y X. Barandiaran (Eds.), *Buen conocer / FLOK Society: Modelos sostenibles y políticas públicas para una economía social del conocimiento común y abierto en el Ecuador* (pp. 165-222). IAEN-CIESPAL. https://book.floksociety.org/wp-content/uploads/2015/05/4_1_-_Hardware.pdf

Lundvall, B. (Ed.). (2010). *National systems of innovation: Toward a theory of innovation and interactive learning*. Anthem Press.

Mies, R., Häuer, M., y Hassan, M. (2022). Introducing readiness scales for effective reuse of open source hardware. *Procedia CIRP*, *109*, 635-640. https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.306

Ministerio del Poder Popular para Ciencia y Tecnología. (2023). Resolución de Ciencia Abierta (Resolución 216 del 9 de junio de 2023).

MIT Solve. (2024). *OpenFlexure*. https://solve.mit.edu/solutions/87685

Open Source Hardware Association. (s.f.). *Sharing best practices*. OSHWA. https://oshwa.org/resources/sharing-best-practices/

OpenFlexure. (2022a). *Accelerating malaria diagnosis in Tanzania with the OpenFlexure microscope*. https://openflexure.org/openflexurecon2022/community_stories/2022/10/20/openflexurecon-tanzania.html

OpenFlexure. (2022b). *OpenFlexureCon 2022 - Accelerating Malaria diagnosis with Joram Mduda*. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=joDKMM3xalY

OpenFlexure. (2022c). *OpenFlexureCon 2022 - Manufacturing microscopes in Tanzania with Paul Nyakyi*. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=IvbjKBfaWDk

OpenFlexure. (2024). OpenFlexure. https://gitlab.com/openflexure

OpenFlexure. (2026a). *High-resolution microscope bill of materials*. https://build.openflexure.org/openflexure-microscope/master/high_res_microscope_BOM.html

OpenFlexure. (2026b). *OpenFlexure Microscope*. https://openflexure.org/projects/microscope/

Organización Mundial de la Salud. (2024). *WHO compendium of innovative health technologies for low-resource settings: 2024* (inf. téc.). World Health Organization. https://www.who.int/publications/i/item/9789240095212

Pearce, J. (2012). Building research equipment with free, open-source hardware. *Science*, *337*(6100), 1303-1304. https://doi.org/10.1126/science.1228183

Pearce, J. (2016). Return on investment for open source scientific hardware development. *Science and Public Policy*, *43*(2), 192-195. https://doi.org/10.1093/scipol/scv034

Rincón, I. (2025). Transferencia de conocimiento en la innovación: impacto, tendencias y estrategias de relevancia en los sectores sociales y económicos de América Latina. *Economía y Negocios*, *7*(2), 3-13. https://doi.org/10.33326/27086062.2025.2.2231

Sharkey, J., Foo, D., Kabla, A., Baumberg, J., y Bowman, R. (2016). A one-piece 3D printed flexure translation stage for open-source microscopy. *Review of Scientific Instruments*, *87*(2), 025104. https://doi.org/10.1063/1.4941068

Sidik, R., Samsudin, A., Rozali, E., Sham, F., Hanafiah, M., Safiai, M., y Murtza, M. (2025). Feasibility studies across disciplines: A systematic review of methodologies, applications, and strategic insights. *International Journal of Research and Innovation in Social Science*, *9*(3), 209-212. https://doi.org/10.47772/IJRISS.2025.90300015

Stirling, J. (2025). *OpenFlexure: What it takes to get medical device certification for an open source microscope*. NLnet. https://nlnet.nl/news/2025/20250806-openflexure-interview.html

The GIST. (2025). *Local ingenuity, global impact: How the OpenFlexure microscope is enabling microscopy for everyone*. https://the-gist.org/2025/06/local-ingenuity-global-impact-how-the-openflexure-microscope-is-enabling-microscopy-for-everyone/

UNESCO. (2020). *Apoyar el hardware abierto para la ciencia abierta* (inf. téc.). UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386890_spa

El derecho a reparar como práctica de soberanía tecnológica: Fundamentos y estrategias para nodos de soberanía en las instituciones educativas venezolanas

Aida Andrade[1]

Introducción

El parque tecnológico venezolano, al igual que muchos otros sectores de la dinámica diaria, atraviesa un proceso de asfixia derivado de las Medidas Coercitivas Unilaterales (MCU) impuestas por los Estados Unidos de América contra el pueblo venezolano, las cuales operan en función de marginalizar para subordinar nuestra tecnología. Partiendo de la visión de la innovación soberana que nos ocupa, estas sanciones no deben entenderse solo como obstáculos estratégicos de operación y organización, sino como mecanismos que acentúan la relación asimétrica entre el hemisferio norte y los países en desarrollo (Dosi, 1982). Sin embargo, cabe mencionar que el efecto colateral de la crisis que generan es el de estimulador o propulsor de innovación y soberanía. Al restringir el acceso a dispositivos, a sus repuestos y actualizaciones privativas, las MCU generan el rompimiento con la dependencia y abren paso a lo que Hong et al. (2019) denominan "Derrame Tecnológico Inverso" (*Reverse Technology Spillover*).

Una de las estrategias que emplean las potencias para el dominio, colonización y control económico es la obsolescencia programada, no es un error de diseño, sino una estrategia premeditada y sistémica propia de la monotecnología dominante. Como advierte Hui (2016), la modernidad occidental ha impuesto un modelo técnico universal que ignora la tecnología local, la integración de los principios éticos con las leyes naturales a través de la técnica. Esta uniformización reduce la tecnología a un simple instrumento de acumulación, facilitando la transición de una "sociedad de productores" a una "sociedad de consumidores" (Bauman, 2006). Cada equipo que descartamos por falta de un repuesto representa una herida a nuestra soberanía. La obsolescencia nos obliga a drenar divisas que bien podrían destinarse a otras áreas, forzándonos a desechar *hardware* que, con voluntad técnica y política, todavía tiene mucho que aportar a nuestras aulas y demás espacios productivos. Un hito fundamental de este control fue el Cártel Phoebus, que en 1925 impuso un límite de 1,000 horas de vida útil a las bombillas, a pesar de que la técnica permitía alcanzar las 2,500 horas, esto con el fin de asegurar el lucro corporativo.

Para autores como García (2021) y Bermúdez y Morales (2025), la obsolescencia se manifiesta en cuatro dimensiones de control: Obsolescencia Técnica/Programada que es

[1]Economista, Licenciada en Educación y Magister Scientiae en Educación, mención Informática y Diseño Instruccional, egresada de la Universidad de Los Andes. Actualmente se desempeña como Investigadora en el Centro de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL). Autora de publicaciones académicas y de divulgación científica. aandrade@cenditel.gob.ve

la reducción deliberada de la durabilidad desde el diseño. La Obsolescencia Funcional que se presenta con la incompatibilidad provocada mediante actualizaciones de *software* que ralentizan el *hardware* preexistente. La Obsolescencia Psicológica/Estética la cual implica manipulación de la percepción del usuario mediante el *marketing* para generar "envidia propulsora" y deseos de renovación superficial. Y finalmente, la Obsolescencia Indirecta que significa el impedimento físico de la reparación mediante el sellado de componentes o la negación de acceso a manuales técnicos (López, 2025). Este sistema perpetúa una forma de subordinación donde el conocimiento técnico es secuestrado por las corporaciones, haciendo que la respuesta política sea, necesariamente, la exigencia de un derecho técnico al acceso y la modificación.

Ante esta indeseada estrategia surge el planteamiento del "Derecho a Reparar" el cual emerge como una práctica política esencial para la autonomía técnica. No se limita al acto mecánico de arreglar un objeto, sino que reclama el derecho de poseer la soberanía sobre su cultura material. En el contexto venezolano, este movimiento es la contraposición al control corporativo, pues busca democratizar las herramientas necesarias para enfrentar la "obsolescencia indirecta".

El movimiento por el derecho a reparar en Venezuela trasciende la mera reivindicación del consumidor para configurarse como una práctica de soberanía tecnológica y resistencia material con profundas raíces históricas. Este fenómeno hunde sus orígenes tanto en las luchas globales contra el monopolio de la propiedad intelectual como en la tradición popular venezolana de la autogestión y el "resuelve" frente a la escasez de componentes. En un contexto signado por la obsolescencia programada y las severas restricciones en la importación de insumos técnicos, de acuerdo con datos de Misión Verdad (2020), las dinámicas económicas locales han catalizado respuestas organizadas donde la refaccionarización actúa como un amortiguador clave frente a la desinversión industrial y el deterioro de la infraestructura productiva.

En la actualidad, este movimiento hace vida activamente en los talleres de electrónica popular de las zonas urbanas, las brigadas comunitarias de mantenimiento escolar y las redes de colectivos informáticos en ciudades como Caracas, Maracaibo y Barquisimeto, donde se articulan la manufactura local, la impresión 3D y el *software* libre. Asimismo, Herrera (2020) destaca que la soberanía tecnológica popular no solo desafía los monopolios corporativos sobre los repuestos propietarios, sino que consolida un modelo de gestión del conocimiento distribuido que democratiza los saberes técnicos.

Por todo lo expuesto, nos aventuramos mediante este trabajo a presentar los fundamentos del Derecho a Reparar como base técnica para la propuesta de reparación comunal en los planteles escolares venezolanos. Se detallará qué es la reparación desde el *software* y el *hardware* libre, la arquitectura técnica del conocimiento para la reparación, la fundamentación de los nodos de reparación comunal y su impacto en las 7T y finalmente, un modelo de gestión sostenible.

Desarrollo

Para iniciar la aproximación al tema, es importante precisar que aun cuando existe una estrecha relación entre el Derecho a Reparar y la Economía Circular estas se distinguen entre sí, para detallar su alcance político en el marco de la innovación soberana, se debe diferenciar que el primero tiene como enfoque principal la autonomía técnica y soberanía sobre el conocimiento, su mecanismo es el acceso obligatorio de manuales, piezas y esquemas, su objetivo político es la soberanía tecnológica, desmantelar el control del norte, y el actor clave son los usuarios, talleres locales y laboratorios estatales.

Ahora, en la Economía Circular vemos como enfoque principal la gestión eficiente de flujos de materiales y energía, su mecanismo es el eco diseño y el reciclaje industrial, su objetivo político es la sostenibilidad ambiental dentro del mercado y el actor clave son las industrias y gestores de residuos. Por otro lado, se hace imperativo comprender que el Derecho a Reparar es materialmente imposible sin los fundamentos éticos del *hardware* y *software* libre. Sin el acceso al código y a los esquemas electrónicos, la reparación queda sujeta al permiso del fabricante, perpetuando la periferización incluso en el intento de autonomía.

La soberanía tecnológica requiere una base ética de apertura total. Las tecnologías libres no son solo herramientas, sino la garantía de que el conocimiento no sea privatizado. En este sentido, las metodologías "Hazlo tú mismo" (*Do It Yourself* - DIY) y "Hagámoslo juntos" (*Do It With Others* - DIWO) funcionan como estrategias de resistencia colectiva y transferencia tecnológica equitativa (Batteau, 2010). Este enfoque se vincula con el "Aceleracionismo" propuesto por Bermúdez y Morales (2025): la necesidad de impulsar el desarrollo tecnológico local al máximo para trascender los límites impuestos por el capital dependiente y generar un cambio social radical.

Los pilares que viabilizan esta reparación soberana son, en primer lugar la transparencia radical que da acceso al código fuente y esquemas de *hardware* para auditar y reparar. La modularidad soberana que incluye diseños que permiten la sustitución de partes con componentes locales o genéricos. La tecnodiversidad que garantiza el desarrollo de soluciones basadas en nuestra propia "cosmotécnica" y necesidades territoriales. Y finalmente el conocimiento común, que no es otra cosa que el uso de licencias que prohíben el impedimento del saber técnico.

Estos principios éticos encuentran su soporte institucional en el marco jurídico venezolano, diseñado para proteger el interés público frente al dominio corporativo. Venezuela posee una estructura jurídica que, interpretada desde la sociología de la tecnología, ofrece herramientas de resistencia antiimperialista frente a la obsolescencia. La integración de este marco con la práctica de reparación es fundamental para consolidar la autonomía nacional.

- **Ley de Infogobierno (2013):** Más allá de la estandarización, esta ley es un acto de resistencia que obliga al Estado a utilizar tecnologías libres. Al exigir estándares abiertos, se protege el interés público contra el control corporativo externo,

asegurando que los procesos del Estado no queden bloqueados por licencias privativas o la caducidad impuesta por proveedores corporativos. Es la base jurídica de nuestra soberanía de datos.

- **Ley de Gestión Integral de la Basura (2010):** Al aplicar la "responsabilidad extendida del productor", esta ley debe interpretarse bajo la lente de la justicia social y ambiental. La acumulación de desechos electrónicos en los países en desarrollo no es un accidente, sino una forma de "racismo ambiental" o "vertedero colonial" (*colonial dumping*). Esta ley faculta al Estado para combatir la obsolescencia como una agresión ecológica, promoviendo la extensión de la vida útil de los productos como un imperativo ético (López, 2025).

Cabe destacar que la crisis impuesta por las MCU representa la oportunidad histórica de transitar desde la "monotecnología" de consumo hacia una "tecnodiversidad" soberana. El Derecho a Reparar, respaldado por un marco legal robusto y una ética de tecnologías libres, es la vía para transformar la limitación material en una potencia de innovación nacional independiente.

La acumulación de computadoras obsoletas en nuestras escuelas no es solo un montón de basura; es el reflejo físico de una gestión fallida. Este "cementerio tecnológico" nace de una ruptura total entre lo que dicen los papeles y lo que ocurre en las aulas. En tanto que los expertos Pimenta y Seco (2019) sostienen que la administración moderna exige registros precisos y en tiempo real, la realidad es otra, los sistemas de inventario funcionan de forma aislada. Esto crea "activos fantasma", equipos que legalmente ya no valen nada, pero que físicamente siguen ocupando espacio y contaminando el entorno. La falta de dinero para mantenimiento y una gestión que ignora la vida útil real de las máquinas logran lo impensable, que herramientas diseñadas para educar terminen convertidas en chatarra antes de tiempo.

Desde una perspectiva ambiental, López (2025) definen la acumulación masiva de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos como un reto crítico de salud pública. Esto se debe a la presencia de materiales tóxicos como el plomo y el mercurio que, de no ser gestionados bajo una lógica de reuso, amenazan gravemente los ecosistemas locales. En este escenario, la degradación del parque tecnológico educativo —ejemplificado en programas de dotación masiva como las laptops Canaima— responde a una tipología de fallas que pueden sistematizarse claramente para su posterior intervención.

Por un lado, las fallas de *hardware* surgen por desgaste prematuro en componentes críticos de la placa base (como condensadores, MOSFETs y reguladores de voltaje) o por daños mecánicos en bisagras y carcasas que precipitan el descarte total. Por otro lado, las fallas de *software* evidencian una obsolescencia impuesta tras la ruptura de compatibilidad por actualizaciones de *software* privativo y el abandono del soporte para arquitecturas de 32 bits. Este "extractivismo tecnológico" fuerza la rotación de activos y desvincula *hardware*

aún funcional de los estándares de conectividad actuales.

Identificar qué falla en nuestras computadoras es, en realidad, mapear nuestra propia resistencia. Al diagnosticar, no solo vemos circuitos dañados o brechas digitales; vemos la oportunidad política de rescatar activos, ahorrar divisas y demostrar que la autonomía técnica comienza con un soldador y la decisión de no rendirse ante el mercado.

La reparación desde el software libre como resistencia a la obsolescencia

Elegir *software* libre es mucho más que una decisión técnica; es una forma de rebelarnos contra esa cultura de "usar y tirar" que nos imponen las grandes corporaciones. Es nuestra mejor herramienta para combatir la obsolescencia programada y evitar que otros decidan desde lejos qué tecnología debemos usar y cómo. Al usar programas abiertos, le devolvemos la vida a esos equipos que el mercado ya llama "basura", permitiéndonos aprovechar al máximo lo que ya tenemos. Como bien señalan Marín et al. (2024), el *software* libre tiene la magia de hacer lo mismo que los programas comerciales, pero de forma mucho más ligera y eficiente. El objeto es recuperar las computadoras que aún tienen vida útil, con un gasto mínimo.

Esta reparación ofrece grandes beneficios, en primer lugar, el rescate de equipos permite que gracias a sistemas más ágiles, una computadora "vieja" pueda volver a ser totalmente funcional, rompiendo el ciclo de compras forzadas. También se logra la independencia económica, en lugar de gastar presupuestos públicos o escolares en pagar licencias interminables, el control del código nos permite decidir nuestro propio camino, ahorrando recursos como sugieren Pimenta y Seco (2019). Otro beneficio es la prioridad pedagógica, la soberanía tecnológica significa que la educación debe adaptarse a lo que los estudiantes necesitan aprender, y no a lo que las empresas quieren vender. Se puede afirmar que recuperar el control de nuestros programas es el primer paso para dejar de ser dependientes. Sin embargo, para que este cambio sea real y duradero, no basta con instalar un nuevo sistema; también necesitamos manos y espacios preparados para cuidar y mantener físicamente esos equipos.

La reparación desde el hardware libre y la manufactura digital

Ser dueños de nuestra tecnología significa poco si no tenemos el derecho a saber cómo funciona por dentro. La verdadera soberanía empieza cuando podemos acceder a los "mapas" de nuestros equipos (esquemáticos y manuales). El *Hardware* Libre no es más que eso, democratizar el conocimiento para que cualquier persona pueda salvar un dispositivo.

El planteamiento es curar en lugar de desechar, a veces, la diferencia entre un equipo que va a la basura y uno que vuelve a la vida es una pieza mínima. Cambiar un componente de apenas 0,50 USD en lugar de gastar 150 USD en una tarjeta nueva no es solo una reparación; es un acto de rebeldía económica. Es decidir que nosotros controlamos nuestros bienes y, de paso, cuidamos el presupuesto de la nación evitando importaciones innecesarias. Otra posibilidad es fabricar lo que ya no existe, gracias a la impresión 3D y el diseño digital,

hoy podemos fabricar localmente esas pequeñas piezas (botones, bisagras o soportes) que las grandes marcas ya no venden. Esto convierte a nuestros laboratorios en centros de creación donde lo que antes era "desperdicio" se transforma en una solución inmediata.

Incluso cuando un equipo llega al final de su vida útil, no tiene por qué ser una carga para el planeta. Según expertos como Marín et al. (2024), la basura electrónica es en realidad una "mina" urbana, estos desechos contienen entre un 40 % y 70 % de metales útiles (acero y cobre). Y se pueden recuperar hasta 100 gramos de oro por cada tonelada de circuitos. Es el valor que no se pierde.

Gestionar la tecnología de forma integral (reparando, fabricando o reciclando) es cerrar un círculo de respeto por el medio ambiente. Es pasar de ser simples consumidores a ser guardianes de nuestras herramientas, asegurando que cada inversión social rinda al máximo y que nada se pierda.

Arquitectura técnica del conocimiento para la reparación

En lugar de resignarnos a ver cómo la tecnología se acumula en el olvido, proponemos transformar nuestras instituciones en verdaderos motores de innovación. Inspirados en las mejores prácticas de gestión, marcos de trabajo que proporcionan mejores prácticas para la gobernanza y gestión de TI, alineando los servicios tecnológicos con los objetivos (como ITIL y COBIT), planteamos un modelo de recuperación nacional dividido en tres niveles que trabajan al unísono:

- **1. Conocer para sanar (Capa de Diagnóstico):** El primer paso es dejar de adivinar. Usamos herramientas de precisión, como cámaras térmicas y planos digitales, para entender la salud real de cada componente. Así, lo que antes eran solo "números en un inventario" se convierten en activos vivos y reales que sabemos exactamente cómo recuperar.

- **2. Dar vida y seguridad (Capa Lógica):** No solo reparamos máquinas, las liberamos. Al instalar *software* libre y sistemas abiertos, limpiamos los equipos de brechas de seguridad y los hacemos más robustos, garantizando que el control de la tecnología esté siempre en nuestras manos y no en las de una empresa privada.

- **3. El arte de reparar y crear (Capa de Manufactura):** Aquí es donde ocurre la magia técnica. Gracias a la fabricación digital y las reparaciones avanzadas, cada intervención queda documentada. Esto asegura que el conocimiento se quede con nosotros y que no dependamos de nadie de afuera para mantener nuestras herramientas funcionando.

Esta estructura convierte a las escuelas y centros educativos en laboratorios de soberanía. Al unir la administración financiera con la capacidad real de arreglar lo que tenemos, el Estado deja de ser un simple comprador de aparatos para convertirse en un gestor consciente de su futuro. Así, garantizamos que la educación digital sea sostenible, no porque compremos más, sino porque aprendimos a cuidar y potenciar lo propio.

Los Nodos de Soberanía (NS): Un nuevo paradigma formativo-productivo

Más que simples centros de arreglos técnicos, los Nodos de soberanía, aprovechables en la reparación de artefactos, son espacios donde las comunidades ejercen una reapropiación técnica y territorial de sus medios de vida. Como señalan investigaciones sobre la autogestión y el poder popular (Sanoja y Vargas, 2019), estas instancias trascienden el mero servicio mecánico para constituirse en experiencias de democracia directa, donde los ciudadanos no solo recuperan la funcionalidad de sus tecnologías, sino que desarrollan procesos autogestionarios. En el horizonte hacia la construcción del Estado Comunal, dichos nodos funcionan como herramientas vivas para que la población reduzca la dependencia hacia paquetes tecnológicos externos e importados (Jiménez, 2024).

Sin embargo, este modelo formativo-productivo entraña tensiones inherentes a la transformación institucional. Al erigirse como núcleos comunitarios de soberanía popular, estos nodos suelen colisionar con las inercias y normativas de la administración pública municipal tradicional (Sanoja y Vargas, 2019). De acuerdo con Candón (2012), la viabilidad de estos nodos depende de su capacidad para articular redes de intercambio técnico libre e impresiones 3D a escala territorial. El principal desafío político y metodológico radica en consolidar la autonomía comunitaria sin ser absorbidos por la burocracia institucional, garantizando que el saber popular prevalezca en la gestión del territorio (Jiménez, 2024).

Impacto estratégico en el plan de las 7T (Enfoque selectivo)

Alinear nuestra organización con las 7 Transformaciones (7T) (Presidencia de la República Bolivariana de Venezuela, 2024) no es solo un trámite administrativo; es entender que la ciencia y la tecnología son llaves para nuestra libertad. A través de los NRC, el conocimiento deja de estar guardado en oficinas de élite y pasa a manos de la gente, convirtiéndose en un tesoro compartido para construir nuestra propia soberanía desde el barrio y la comuna.

1. **6T - Ciencia y Tecnología:** Queremos que la ciencia sea para todos. Por eso, apostamos por las Tecnologías Libres: herramientas que podemos usar, estudiar, compartir y mejorar sin pedir permiso a grandes corporaciones. Al reparar y crear nuestro propio *software* y *hardware*, rompemos con la dependencia de "cajas negras" que nadie entiende. Aquí, la comunidad es la arquitecta de sus propias soluciones.

2. **2T - Bienestar Social:** Garantizar la educación pública también significa cuidar los equipos que la hacen posible. Al organizarnos para mantener y reparar las computadoras y servidores de nuestras escuelas, estamos ejerciendo un "autogobierno" que protege el derecho de nuestros hijos a estudiar, gestionando nuestros recursos con responsabilidad y autonomía.

3. **5T - Ecología:** Frente a un modelo que nos empuja a comprar y desechar sin parar, nosotros elegimos el derecho a reparar. En lugar de botar lo que parece viejo, recuperamos piezas y damos nueva vida a los equipos. Esto no solo nos ahorra dinero, sino que reduce la contaminación y la basura electrónica en nuestro entorno. Es tecnología con conciencia, que alarga la vida de los dispositivos y respeta el lugar donde vivimos.

El objetivo no es ser un centro que solo "recibe ayuda", sino convertirse en una comunidad productiva y organizada que sabe hacia dónde va y tiene las herramientas para sostenerse por sí misma en el tiempo.

Modelo de gestión sostenible: El taller escuela de reparación con tecnologías libres

Para que el pueblo sea realmente libre, necesita ser dueño de su propio sustento. Por eso, en lugar de esperar de brazos cruzados por recursos del Estado, los Núcleos de Recreación y Conocimiento (NRC) dan vida al modelo de "Taller Escuela". No es solo un lugar donde se arreglan cosas; es un espacio donde los vecinos aprenden un oficio mientras resuelven los problemas de su comunidad, dejando atrás la idea de enriquecer a unos pocos para enfocarse en el bienestar de todos.

Tabla 1: Comparación entre el Modelo Tradicional y el Modelo de Gestión NRC

Característica	**Modelo Tradicional (Mercantil)**	**Modelo de Gestión NRC (Comunal)**
Objetivo Principal	Acumulación privada de capital.	Bienestar colectivo y satisfacción de necesidades.
Tecnología	*Software* privativo (Dependencia).	Tecnologías Libres (Soberanía y autonomía).
Relación Social	Cliente como consumidor pasivo.	Vecino como copartícipe y sujeto activo.
Gestión del Saber	Conocimiento cerrado y restringido.	Taller-Escuela: Socialización del conocimiento.
Enfoque Ambiental	Promueve el consumo y el residuo.	Economía circular, derecho a reparar y mitigación de *e-waste*.

Fuente: Elaboración propia (2026).

Este modelo se mantiene en pie gracias a la unión de la gente y la creación de cooperativas solidarias. Aquí, el dinero que sobra no se va a una cuenta bancaria privada, sino que se reinvierte en la misma comunidad.

Elegir Tecnologías Libres no es solo un ahorro; es un acto de rebeldía y soberanía. Nos permite abrir los equipos, entender cómo funcionan y arreglarlos sin pedirle permiso a ninguna empresa extranjera.

Al final del día, gestionar nuestros propios recursos es la forma más pura de democracia. Cuando reparar un equipo se convierte en un acto de enseñanza y compromiso, la tecnología deja de ser un lujo para convertirse en una herramienta de justicia social. Estamos demostrando que, cuando el pueblo se organiza y aprende, tiene en sus manos el poder de construir su propio futuro.

Conclusiones

Los resultados de este estudio no son un punto final, sino el reflejo de una lucha viva. Venezuela, frente al bloqueo y las sanciones que intentan el aislamiento tecnológico, no se ha quedado de brazos cruzados. Lo que empezó como una crisis se convirtió en el impulso para la introspección y descubrir que la verdadera soberanía no es comprar aparatos nuevos, sino saber cómo funcionan y cómo salvarlos.

La verdadera independencia no reside en el objeto que se consume, sino en el conocimiento técnico y el "saber hacer". Mientras la filosofía de mercado promueve el desecho constante de lo averiado para estimular el consumo masivo, la resistencia activa combate esta dinámicamente innecesaria mediante la cultura del arreglo. Cada vez que alguien abre una computadora y logra devolverla a la vida, rompe de manera contundente con años de dependencia estructural. Esta soberanía se apoya en tres pilares fundamentales: en primer lugar, el aprendizaje de lo propio, mediante el cual se generan soluciones autogestionadas cuando el soporte oficial da la espalda, transformando la necesidad en una escuela de inventiva; en segundo lugar, la emancipación frente a los patrones de consumo habituales, donde se transita del comprar por obligación al mantener por convicción, protegiendo así los recursos y garantizando que la educación no se detenga por falta de divisas; y finalmente, la reparación concebida como un acto de rebeldía, donde cada equipo recuperado representa una victoria frente a quienes pretenden mantener la infraestructura en una obsolescencia supeditada a poderes extranjeros.

Frente a la "obsolescencia programada", esa trampa de las grandes empresas para que todo dure poco y el lucro nunca pare, nosotros alzamos el Derecho a Reparar. No queremos ser simples consumidores pasivos; queremos ser dueños de nuestra realidad técnica.

Para que esto sea posible, se necesita transparencia. El acceso a los manuales, a los planos electrónicos y al *software* libre no es un lujo, es un derecho ciudadano. Es la única forma de que el conocimiento vuelva a las manos de la gente, permitiendo que el pueblo

deje de ser un espectador y se convierta en el gestor de su propio futuro.

Esta visión se hace realidad en los Nodos de Reparación Comunal (NRC). Estos espacios son mucho más que talleres; son centros de autogobierno donde la comunidad se organiza para que las laptops de los niños no se conviertan en chatarra olvidada. Al reparar el *hardware*, también se está reparando el tejido social. El impacto es enorme: mientras el mercado nos obligaría a gastar 150 dólares en una tarjeta nueva, nuestro ingenio permite salvarla cambiando un pequeño componente de apenas 50 centavos. Eso es eficiencia con rostro humano.

El Derecho a Reparar es la respuesta al "basurero colonial" en el que quieren convertir los países del sur. Al optimizar un sistema viejo o rescatar un equipo del olvido, el pueblo venezolano está ejerciendo su derecho a existir con autonomía. No se trata solo de arreglar máquinas; se trata de construir una sociedad donde la ciencia esté al servicio de la vida y la libertad, y nunca más al servicio de la dominación.

Referencias

Batteau, A. (2010). *Technology and Culture*. Waveland Press.

Bauman, Z. (2006). *Vida de consumo*. Fondo de Cultura Económica.

Bermúdez, C., y Morales, J. (2025). Aceleracionismo y soberanía tecnológica en América Latina. *Revista de Filosofía y Tecnología*, *14*(1), 45-68.

Candón, J. (2012). *Toma la calle, toma las redes: El movimiento 15M en Internet*. Atrapasueños.

Dosi, G. (1982). Technological paradigms and technological trajectories: A suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. *Research Policy*, *11*(3), 147-162. https://doi.org/10.1016/0048-7333(82)90016-6

García, A. (2021). *Obsolescencia programada y consumo responsable*. Editorial Tecnos.

Herrera, F. (2020). Soberanía tecnológica popular y gestión distribuida del conocimiento. *Cuadernos del CENDES*, *37*(104), 115-138.

Hong, Y., Sun, B., y Wang, S. (2019). Reverse technology spillover and innovation efficiency. *Journal of Asian Economics*, *65*, 101138. https://doi.org/10.1016/j.asieco.2019.101138

Hui, Y. (2016). *The Question Concerning Technology in China: An Essay in Cosmotechnics*. Urbanomic.

Jiménez, R. (2024). Autonomía comunitaria y Estado Comunal frente a la burocracia institucional. *Revista Venezolana de Economía y Ciencias Sociales*, *30*(1), 77-95.

López, M. (2025). Vertedero colonial y racismo ambiental: El impacto de los residuos electrónicos. *Revista de Ecología Política*, *52*, 89-102.

Marín, L., Gómez, R., y Silva, P. (2024). Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE): Minerías urbanas y sostenibilidad. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *40*, 201-218.

Misión Verdad. (2020). *El impacto de las sanciones en la infraestructura tecnológica venezolana*. Consultado el 25 de octubre de 2026, desde https://misionverdad.com

Pimenta, R., y Seco, A. (2019). Gestión de activos de TI e inventario en la administración pública. *Revista de Administración Pública y Tecnologías de la Información*, *8*(2), 33-50.

Presidencia de la República Bolivariana de Venezuela. (2024). *Plan de las 7 Transformaciones (7T): Rumbo al 2030* (inf. téc.). Gobierno Bolivariano de Venezuela. Caracas.

Sanoja, M., y Vargas, I. (2019). *La Revolución Bolivariana y la construcción del poder popular*. El Perro y la Rana.

Aprender para compartir: El impacto del uso de las Tecnologías Libres en Toparquía

Yazmary Rondón[1]

Introducción

Toparquía surge en el año 2013 como una ventana para mostrar los proyectos desarrollados en CENDITEL, y a su vez como una oportunidad para la formación a partir de los mismos, generando una vía de apropiación del conocimiento libre, construido en colectivo y mediado por tecnologías libres en correspondencia con la filosofía de CENDITEL. Toma su nombre en honor a la idea de Simón Rodríguez sobre "el gobierno del lugar" donde la comunidad se organiza y gestiona sus recursos y soluciones, sostenida en una educación autónoma, corresponsable y en busca del bien común.

En este sentido, este ensayo expone un desarrollo teórico sobre la importancia del uso de las tecnologías libres en la formación en línea y sus beneficios para aprender, contextualizar y distribuir contenidos o software, sin restricciones de licencias propietarias. Enfocándose en la soberanía digital mediante las herramientas de código abierto implementadas en el entorno virtual de formación de CENDITEL: Toparquía.

Esta plataforma de cursos en línea constituye un espacio de formación dirigido a estudiantes, profesionales y público en general, desde niños y niñas hasta adultos. Acerca de temáticas relacionadas a: Aprendizaje en Robótica, Fundamentos teóricos de la Seguridad de la Información, Políticas Públicas en Ciberseguridad y Metodologías para el desarrollo de software libre, entre otros; abordadas desde miradas pedagógicas, legales, políticas y técnicas; disponibles de manera ubicua (en cualquier lugar y momento) y por medio de diversos dispositivos digitales.

Caracterización de Sistemas de Gestión del Aprendizaje (LMS): Chamilo como base de la Plataforma Toparquía

- **Sistemas de Gestión del Aprendizaje (LMS)**

Un sistema de gestión de aprendizaje es un espacio donde convergen la enseñanza y el aprendizaje a través de medios digitales que permiten el montaje, desarrollo y evaluación de contenidos por parte del profesor, al tiempo que el estudiante interactúa y construye

[1]Licenciada en Educación mención Matemática, MSc. en Educación mención Informática y Diseño Instruccional y Doctora en Educación, egresada de la Universidad de Los Andes. Profesora Titular de la ULA, docente en pregrado y postgrado en la Facultad de Humanidades y Educación. Tutora y jurado de tesis de pregrado, maestría y doctorado. Investigadora PEI- ULA 2025 e investigadora en el Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL). Autora y editora de publicaciones académicas y de divulgación científica. yrondon@cenditel.gob.ve

significados a partir de los objetos de aprendizaje facilitados por la plataforma LMS. Por lo tanto, sus características principales son:

- Desarrollo y distribución de contenidos en diversos formatos (textos, audios, videos, imágenes).
- Seguimiento, reportes de progreso y rendimiento estudiantil.
- Automatización de evaluaciones y recordatorios de actividades pendientes, entre otras.
- Interacción entre estudiantes y facilitadores a través de herramientas de comunicación síncrona y asíncrona.

Plataformas como Moodle y Chamilo lideran la creación de entornos virtuales interactivos de código abierto. También, existen privativas con pago por suscripción como Canvas LMS, Anthology (anteriormente Blackboard) y otras más. Enfocándonos en las de código abierto, Moodle es una plataforma muy utilizada en el ámbito académico debido a su sencillez, seguridad, disponibilidad y practicidad. Permite la creación de cursos y su organización en secciones, módulos o unidades, cuenta con una gran variedad de recursos y herramientas para el dinamismo e interactividad con los contenidos (wikis, foros, tareas, chat, encuestas, entre otros). Moodle cuenta con una comunidad que constantemente amplía los complementos de distribución base, así como su integración a otras plataformas de repositorios de contenidos, detección de plagio, entre otras (Moodle, 2022).

Asimismo, Chamilo es una plataforma de código abierto, se distribuye bajo licencia GNU/GPLv3, permite a cualquier persona, institución o empresa crear cursos en línea, hacer seguimiento del avance de los participantes y evaluar, a través de recursos y herramientas de: ejercicios, tareas, encuestas, foros, entre otras. Por lo tanto, constituye un espacio de creación de objetos de aprendizaje dinámico e intuitivo, donde se pueden crear lecciones desde cero o mediante la importación de objetos de aprendizaje elaborados a partir de Recursos Educativos Abiertos (REA) de los cuales hablaremos más adelante. También cuenta con una comunidad numerosa de usuarios en todo el mundo debido a su modelo ético de desarrollo, interfaz sencilla e intuitiva (Chamilo, 2024).

Toparquía

En este sentido, Toparquía ha sido personalizada en Chamilo ofreciendo una imagen de formación institucional, académica y sencilla (Figura 1). Desde su inicio en el 2013 Toparquía ha ofrecido más de una docena de cursos en línea sobre temáticas de interés técnico, comunitario, ambiental, administrativo, entre otras; promoviendo la participación de estudiantes, profesionales y público en general. No solo de adultos, sino también de niños y niñas, como ocurrió en el curso: Aprendizaje en Robótica en el año 2025.



Figura 1: Plataforma Toparquía.
Fuente: Toparquía (2026)

13 años después Toparquía cuenta con un total de 13.494 usuarios, de los cuales 60 son profesores y 13.434 son estudiantes (Figura 2), que se han ido registrando en la plataforma y en los diversos cursos que se han ofrecido año tras año.

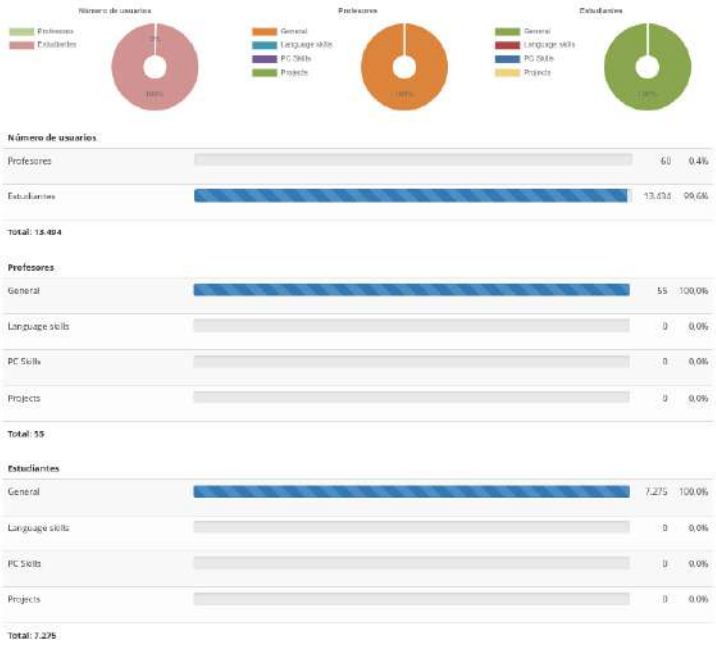


Figura 2: Número de usuarios de Toparquía entre profesores y estudiantes.
Fuente: Toparquía (2026)

Se han alojado a lo largo del tiempo 61 cursos (Figura 3), esta cantidad considera las diversas ediciones año tras año de los siguientes cursos que toman en cuenta temas de interés (Seguridad de la Información, Aprendizaje en Robótica, Ciberseguridad, entre otros), evolución de las tecnologías (Firma electrónica, Metodologías de desarrollo colaborativo de software libre, Gestión de recursos institucionales, entre otras) y necesidades sentidas (Metodología de planificación integral para espacios comunales, Planificación estratégica situacional para la administración pública nacional, Gestión de Información Forestal, entre otros). También, se van diseñando nuevos cursos (Metodología de la investigación, Redacción de artículos científicos e informes técnicos, entre otros) y/o actualizando los existentes.

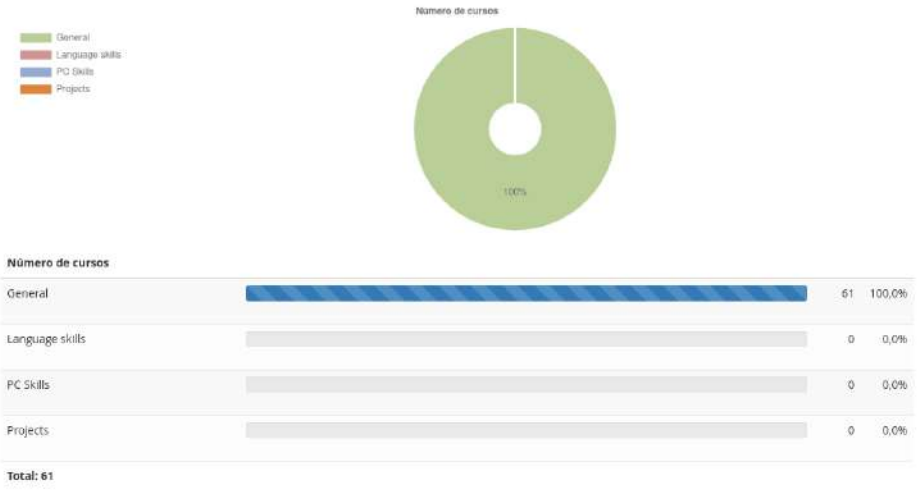


Figura 3: Usuarios de Toparquía.
Fuente: Toparquía (2026)

Cabe destacar que, los datos presentados anteriormente sobre la cantidad de usuarios y cursos en Toparquía se recopilaron y analizaron mediante las herramientas que ofrece Chamilo en su secciones de: Informes por curso y Estadísticas de cursos y usuarios.

A continuación, se detallarán los recursos y herramientas libres utilizados en el diseño instruccional y gráfico de los cursos. Las características fundamentales de todos los cursos de Toparquía van de la mano con la filosofía de CENDITEL en cuanto al uso y promoción de las tecnologías libres, la apropiación y construcción colectiva y autónoma del conocimiento, como bien común.

Recursos Educativos Abiertos (REA) y herramientas de Ofimática y diseño libres utilizadas para la curaduría de contenidos y el fomento de competencias digitales en Toparquía

En los cursos de Toparquía se han aprovechado al máximo la gran variedad de herramientas que ofrece Chamilo para la creación de contenidos (Documentos, lecciones, ejercicios, evaluaciones y tareas), Interacción y Comunicación (Foro, chat y anuncios, entre

otros), Gestión y Seguimiento (Agenda, progreso de los usuarios, entre otros). De igual manera, se han complementado con otras aplicaciones de Recursos Educativos abiertos (REA) como archivos SCORM para la subida de lecciones desarrolladas en Exelearning.

Los REA según Rondón (2024, p. 148) "son entendidos como materiales de enseñanza y aprendizaje en cualquier formato (libros, vídeos, imágenes, software, entre otros), que tienen como característica esencial su disponibilidad bajo licencias abiertas sobre su uso, adaptación y distribución".

En este sentido, todos los materiales de los cursos dispuestos en Toparquía se distribuyen bajo la licencia de Contenidos de CENDITEL, la cual concede permisos para: "...copiar, adaptar, publicar y comunicar los contenidos, preservando en ambos casos los derechos morales de los autores y manteniendo los mismos principios para las obras derivadas, de conformidad con los términos y condiciones de las licencias de software y contenidos de la Fundación CENDITEL" (Derecho Informático CENDITEL, s.f.).

La estructura de los cursos de Toparquía, se basa en:

- **Bienvenida al participante:** a través de un video introductorio en la página principal del curso, donde se presenta de forma general la temática a abordar, las estrategias de formación, interacción y evaluación con los que contará durante el curso (Figura 4).



Figura 4: Video de bienvenida en página principal de curso en Toparquía.
Fuente: Toparquía (2026)

- **Lecciones:** los contenidos se distribuyen en módulos y lecciones de manera didáctica, para generar en el participante una mayor comprensión de la temática tratada. Para ello

se construye una secuencia de clase en *eXeLearning* integrando materiales multimedia compuestos por textos, presentaciones, infografías, videos, entre otros (Figura 5). Se utiliza *eXeLearning* debido a que es una herramienta de código abierto e intuitiva cuyo principal propósito como REA es su posibilidad de ser compartido a través de la Web, permite la creación y exportación de unidades de contenidos multimedia a diversas plataformas en formato SCORM, sin necesidad de contar con conocimientos en HTML u otros similares, se descarga gratuitamente y permite su uso sin conexión a Internet.



Figura 5: Lección de curso en *Exelearning* e infografía diseñada en InKscape subida a Toparquía.
Fuente: Toparquía (2026)

En Toparquía al SCORM subido se le integran tanto los foros (de socialización y consulta de dudas) como las evaluaciones que ofrece Chamilo, estas constan de diversos tipos de preguntas: dicotómicas (verdadero o falso), selección, correspondencia, ordenación, desarrollo, completación, entre otras; con el objetivo de acompañar al participante durante el recorrido del módulo correspondiente.

En consonancia con la filosofía de CENDITEL las herramientas ofimáticas utilizadas en las lecciones para la elaboración de presentaciones y documentos de texto, son realizados sin dificultades mediante el sistema operativo GNU/Linux, con sus respectivas opciones de LibreOffice Impress y LibreOffice Writer, las cuales cuentan con todas las funciones necesarias para la edición y diseño de textos, imágenes, esquemas, entre otros (Figura 6).

En cuanto al diseño gráfico, la elaboración y edición de los videos tanto de introducción del curso como de apoyo de las lecciones, considerando su importancia como medio para ampliar la información y presentarla de forma más cercana al participante, se incorporan

elementos de texto e imágenes para las cuales se utilizan herramientas de código abierto como Krita e Inkscape.



Figura 6: Documento de texto con imágenes en LibreOffice.
Fuente: Toparquía (2026)

También, en el diseño de infografías se utiliza la herramienta Inkscape que ofrece un editor de gráficos vectoriales libre y de código abierto, desarrollado especialmente para GNU/Linux, cuyas funciones permiten el uso de las ilustraciones, logotipos, iconos o diagramas diseñados en cualquier dimensión sin pérdida de la calidad de la imagen.

- **Certificación:** una vez culminado el periodo de duración del curso se procede a revisar los informes que ofrece Toparquía (Chamilo) sobre el rendimiento académico de los participantes. Para efectos de aprobación CENDITEL certifica a los participantes que hayan obtenido un 70 % o más de rendimiento en las evaluaciones propuestas en cada módulo. Los certificados son diseñados en Inkscape, se procesan por medio de un programa generador de certificados desarrollado mediante software libre y luego se suben al repositorio de certificados (Figura 7), donde los participantes lo pueden descargar en formato digital con la firma electrónica correspondiente en cualquier momento; hasta la actualidad se han entregado a través del repositorio más de 5.092 certificados de los cursos.

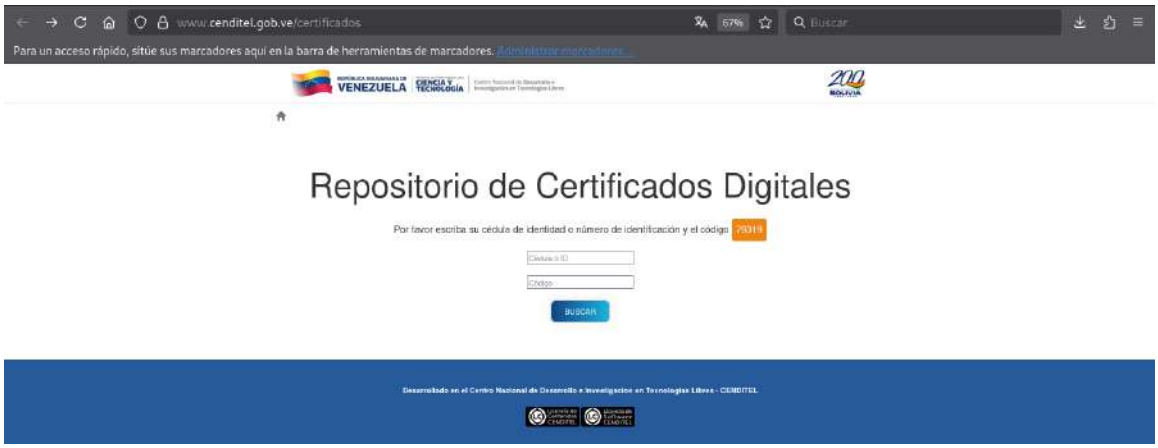


Figura 7: Descarga de certificados digitales de los cursos de CENDITEL.
Fuente: Repositorio de Certificados Digitales de Cenditel (s.f.)

Experiencias en el desarrollo de los cursos en línea a lo largo de los años

- **Temáticas abordadas**

Los cursos relacionados a Seguridad de la Información y Ciberseguridad muestran las implicaciones políticas, económicas, técnicas y jurídico-social, proporcionando una nueva forma de concebir nuestra sociedad. Además, de la importancia de la seguridad informática tanto a nivel laboral como estratégico, especialmente en el ámbito de la Defensa Cibernética del Estado. Constituyen espacios multidisciplinarios para la discusión y análisis de las amenazas cibernéticas actuales y los escenarios futuros que pueden afectar la seguridad nacional. Por tales razones, han sido diseñados para servidores públicos, fiscales del Ministerio Público, jueces o defensores, profesionales de áreas conexas, estudiantes, técnicos y profesionales interesados en el tema.

Los cursos de Firma electrónica Murachí y Gestión de recursos institucionales KAVAC se diseñaron e implementaron con el fin de difundir las funcionalidades y usos de estos dos sistemas de programación diseñados en software libre por CENDITEL. Murachí fue un servicio web para la firma y verificación de documentos firmados digitalmente que incorporó en su momento la funcionalidad de firma en sistemas como correos y páginas web, a partir de un certificado digital emitido por un Proveedor de Servicios de Certificación acreditado ante la Superintendencia de Servicios de Certificación Electrónica (SUSCERTE) (Seguridad de la Información CENDITEL, s.f.).

Por su parte, el sistema Kavac también diseñado bajo estándares de tecnologías libres ofrece herramientas para automatizar la planificación y gestión de recursos humanos, financieros y materiales de cualquier institución pública o privada. Integrando en su diseño modular los procesos administrativos con elementos que garantizan la seguridad e integridad de los datos suministrados en cada instancia de la institución (Servicio Web Gestión

Organizacional CENDITEL, s.f.).

En este mismo orden de ideas, el curso sobre Metodología de desarrollo colaborativo de software libre V.3 está dirigido a profesionales y técnicos del área de las TIC, estudiantes y demás personas interesadas en la organización y gestión de buenas prácticas de desarrollo de software. Esta versión representa una mejora y actualización significativa respecto a la versión anterior, se fundamenta en los principios del desarrollo ágil, promoviendo las entregas frecuentes de software funcional en cada etapa e iteración del desarrollo, mediante la colaboración continua con los usuarios. Principios que permiten a los equipos de desarrollo responder de manera eficiente a los desafíos de un entorno tecnológico en constante evolución y proporcionan un enfoque integral que aborda diferentes roles y responsabilidades en un proyecto de desarrollo de software (Osorio et al., 2026).

Asimismo, por medio de los cursos de Toparquía se han abordado necesidades sentidas de las comunidades y la administración pública nacional (Figura 8). Para ello se diseñaron e implementaron los cursos sobre: a) Metodología de planificación integral para espacios comunales cuya metodología planteaba el desarrollo de tres momentos para la gestión de proyectos en estos espacios: (1) Explicación Situacional, (2) Estudio de Problemas y Potencialidades y (3) Elaboración del Plan de Desarrollo Integral de la Comunidad, dirigido a integrantes de los consejos comunales y público en general de las comunidades; y b) Planificación estratégica situacional para la administración pública nacional, con el objetivo de responder al esquema de planificación participativa, para la vinculación entre la administración pública y la ciudadanía. Entre los materiales se ofrecía una guía para promover las capacidades en la construcción de la planificación estratégica y operacional fortaleciendo la gestión de gobierno, dirigido a organismos de la administración pública, Consejos Estatales, estudiantes de áreas conexas y cualquier persona interesada en el tema.



Figura 8: Temáticas de algunos cursos de Toparquía.
Fuente: Toparquía (2026)

Por su parte el curso de Aprendizaje en Robótica, diseñado e implementado en el 2025, tomó como fundamento la metodología STEAM para el aprendizaje integral de la robótica, por parte de niñas y niños de 6 a 12 años. Así pues, este curso se estructuró en dos rutas cada uno con los mismos cuatro niveles cuyos contenidos sobre: la definición de robótica, estructura de los robots, tipos y programación; solo variaban en el grado de complejidad según las edades, Ruta 1: 1ero, 2do y 3er grado, 6 a 8 años; Ruta 2: 4to, 5to y 6to grado, 9 a 12 años (Figura 9).



Figura 9: Niveles del curso de Aprendizaje en Robótica.
Fuente: Toparquía (2026)

El curso se diseñó mediante un lenguaje sencillo, con una imagen gráfica llamativa (desarrollada mediante videos e infografías con Inkscape e ilustraciones ...), transitando cada nivel en forma de juego, mientras los niños eran acompañados de tres personajes (un niño, una niña y un robot mascota) llamados: Simón, Victoria y Cendibot. De esta manera, los niños aprendían mediante la resolución de adivinanzas, actividades de rompecabezas, completación y movilización de bloques de programación y piezas de los robots (Figura 10).



Figura 10: Secuencia didáctica del nivel 1 del curso de Aprendizaje en Robótica.
Fuente: Toparquía (2026)

- **Impacto en participantes**

Los cursos en línea de CENDITEL año tras año, en cada edición cuentan con participaciones en Toparquía de aproximadamente entre 200 y 300 personas interesadas en las diversas temáticas que se abordan, cuyos intereses fundamentales están en desarrollar habilidades útiles para su trabajo, ampliar sus conocimientos en un área determinada o interés personal. Sin embargo, el curso de Aprendizaje en Robótica, que se dictó para niños y niñas en el 2025 sobrepasó todas las expectativas de participación alcanzando una cantidad de 2.633 niñas y niños mayoritariamente de Venezuela, y también de Colombia, Chile, México, Argentina y Argelia.



Figura 11: Participantes del curso de Aprendizaje en Robótica 2025.
Fuente: Toparquía (2026)

- **Testimonios sobre el uso de tecnologías libres en Toparquía**

La experiencia de trabajo apoyada en tecnologías libres en las diversas áreas de CENDITEL constituye una documentación de los procesos de cambio y adopción de alternativas viables para la generación de productos editoriales (Revista *Clic* y *Trampiando*, libros, entre otros) y contenidos para cursos en línea (Toparquía) que es importante destacar, debido a que materializan la filosofía del conocimiento libre, su difusión, reflexión y apropiación.

En ese sentido, a continuación se presentan los testimonios de varios analistas de las áreas de Investigación, Desarrollo, Apropiación y Reflexión, quienes han autorizado su publicación en este ensayo:

a) **Experiencia en Diseño Instruccional**

Chamilo LMS: Simple y orientado al usuario

"Chamilo LMS fue seleccionado para cumplir dos objetivos: manejar los cursos de CENDITEL y lograr que el personal técnico se incorporara en la publicación de cursos. En ese momento había numerosos profesionales,

pero no se contaba con un equipo dedicado a mantener los cursos. Entonces resultaba necesario hallar herramientas que apoyaran la conformación de un equipo integrado por los especialistas de distintas áreas para el diseño, desarrollo e implementación de los cursos. Chamilo ha cumplido todo lo que se espera de un sistema de gestión de cursos: compatibilidad con otros programas, funciones para la presentación de contenidos, interacción estudiantes-profesores, reporte de indicadores, entre otros aspectos. Su simplicidad —en comparación con otros LMS— permitió que especialistas, diseñadores y facilitadores se adaptaran a un entorno de formación en línea. En otras palabras, contribuyó con la conformación de un espacio para la creación colaborativa de los cursos en línea de CENDITEL. La simplicidad de Chamilo también facilitó que los estudiantes culminen los cursos. Se tiende a equiparar los cursos en línea con las clases presenciales en aspectos como motivación, compromiso y finalización; pero en realidad se trata de entornos de enseñanza-aprendizaje muy diferentes. Chamilo ayudó a ofrecer una experiencia basada en la interacción de los estudiantes y los profesores alrededor de contenidos educativos, lo que significa que funciona como una plataforma para la formación y no como un medio en sí mismo, como puede ocurrir con otros LMS".

Dr. Santiago Roca
Analista del área de Reflexión

b) **Experiencia en Diseño Gráfico**

"Las tecnologías libres, como apoyo para las fuentes de productividad, han sido una alternativa potente en el desarrollo de los productos gráficos de Toparquía, aportan crecimiento a la institución, permite a las personas con talentos en el área de diseño y composición expresarse y demostrar sus capacidades, e impulsan una sociedad digital más colaborativa e independiente, sin necesidad de pagar licencias costosas que afectan directamente la asignación de los recursos anuales de una institución, particularmente de administración pública. El uso de tecnologías libres me ha permitido, desde el área del diseño, indagar e innovar en nuevos experimentos gráficos para mejorar la calidad y el tipo de productos. La implementación de herramientas como Inkscape, al ser una alternativa a Adobe Illustrator, cumple funciones similares, permitiendo la vectorización sencilla y fácil de cualquier recurso gráfico, con múltiples herramientas en un panel de trabajo básico que no amerita gran especialización para el manejo del mismo. Otra ventaja es descargar e instalar de manera rápida y sencilla en cualquier computadora cuando estamos en espacios donde no tenemos nuestros equipos personales a la mano, con pocos clics, sin saber de programación y sin pagar a terceros, ya tenemos funcionando el programa, porque además es un sistema que ocupa poco espacio y no requiere gran cantidad de tarjeta gráfica.

Además, tiene la capacidad de vincularse directamente con plataformas de inteligencia artificial que te pueden ayudar, en poco tiempo, a la maquetación de un libro o una página web, y así reducir el tiempo de producción manual. Asimismo, al ser libre, sus limitaciones de compatibilidad con otros software son reducidas. Este programa, aunado con GIMP, la alternativa de Adobe Photoshop, hacen un equipo perfecto para la edición y montaje de imágenes y fotografías, generando los mismos resultados que el software privativo, pero con sistemas de interfaz más sencillos. Es por esto que, su uso es fundamental para la promoción de la soberanía tecnológica, en donde, desde el ámbito económico se traduce en un ahorro significativo; y en el social y educativo, democratiza el acceso al conocimiento libre."

Arq. Gabriel Martínez
Analista del área de Investigación

c) **Experiencia en la Edición de videos e ilustraciones**

"Antes de trabajar en CENDITEL, había tenido experiencia en el trabajo digital con herramientas de diseño y edición audiovisual en su mayoría de orden privativo, de hecho era una exigencia cuando solicitaban además de mi portafolio la experticia en algunos de estos software que se manejan como estándar en la industria, establecidos en los pensum de estudio de las academias y universidades donde nos formamos los profesionales para estas áreas de creación. Al llegar a CENDITEL se me presenta la exigencia de trabajar con software libre, a pesar de conocer la existencia de algunos de ellos no había tenido la oportunidad de utilizarlos. Comienzo entonces a estudiarlos y a conocer sus potencialidades, para realizar productos en el área de investigación, relacionados con la revista *Trampiando* y cursos en línea de la plataforma Toparquía. Para estas tareas he utilizado dos software de licencia libre que permiten la elaboración de imágenes tanto de mapa de bits o rasterizados, como de vectores, estos son: Krita, un programa que está diseñado para hacer dibujo digital y también animación 2D, este programa posee emuladores gráficos que permiten hacer dibujos con gran calidad plástica y expresiva, y resulta una alternativa muy poderosa frente a los programas privativos tradicionales que había utilizado antes, además su interfaz permite la realización de animaciones 2D con múltiples capas de edición.

El otro programa que utilizo para la ilustración es Inkscape, un software diseñado para la creación y manipulación de formatos vectoriales escalables. En algunas de las tareas vinculo ambos programas aprovechando las posibilidades de cada uno, logrando resultados satisfactorios en lo concerniente a la creatividad y posibilidades estéticas.

Además, para los cursos en línea en Toparquía mi tarea consiste en la elaboración y edición de videos instruccionales o informativos a partir de un guion, en la producción de estos contenidos audiovisuales me apoyo tanto en los dos programas descritos anteriormente como en Kdenlive, que es un programa de licencia libre concebido para la edición de videos. Este programa tiene la virtud de ofrecer algunas funcionalidades libres que en otros programas de orden privativo no están abiertas a menos que se pague una membresía. También en el área audiovisual utilizo Audacity, programa que permite la edición de audio; los videos por lo general presentan una voz en *off*, esta voz es grabada y luego procesada. Este procesamiento es aplicado tanto en la voz como en la ecualización de los diferentes componentes de audio presentes en las piezas audiovisuales. Por lo tanto, mi experiencia en la utilización de herramientas de creación de licencias libres ha sido satisfactoria, me ha permitido abrir mi campo de experimentación en la producción y creación digital, consiguiendo a través de ello la expansión de mis capacidades creativas."

Lic. Miguel Albornoz
Analista del área de Apropiación

d) **Experiencia en Programación y Desarrollo**

"En CENDITEL utilizamos tecnologías libres y nos apoyamos en herramientas de software libre para desarrollar soluciones tecnológicas para la nación, con el objetivo de ofrecer productos de calidad. Estas mismas herramientas nos sirvieron para desarrollar el curso de robótica para niños, dictado en el año 2025 a más de 2.600 niños y niñas. Se trató de un curso didáctico, dinámico, visualmente atractivo y con una gran cantidad de contenido formativo sobre robótica para niños y jóvenes. Gracias a herramientas de software libre como Git, JavaScript, Bootstrap, Django y Vue, entre otras, y a la documentación generada por diferentes comunidades y proyectos de software, pudimos construir un sitio interactivo. Desde el punto de vista técnico, el proceso de desarrollo fue similar a armar un juego de Lego: utilizamos piezas de software que cumplían diferentes funciones, las ensamblabamos y las modificábamos según nuestras necesidades, logrando así desarrollar el curso exitosamente. Adicionalmente, usando software libre también se desarrolló un sistema que permite a los participantes obtener su certificado digital como constancia de haber completado el curso. Fue una experiencia bonita porque se trató de un trabajo colaborativo no solo de desarrolladores de software, sino también de expertos en robótica, diseñadores gráficos y audiovisuales, narradores, instructores y formadores en línea; todos profesionales aplicando las metodologías de investigación y desarrollo para obtener un producto de calidad y de provecho para los niños. También es importante mencionar que varios niños nos ayudaron a probar

el curso antes de su publicación, evaluando la complejidad y el tiempo de finalización, lo que nos permitió realizar los ajustes necesarios."

Ing. Argenis Osorio
Desarrollador de Software de CENDITEL / Analista del área de Desarrollo

- **Beneficios, recomendaciones y limitaciones**

Indudablemente Toparquía aporta beneficios en la difusión del conocimiento como bien común, y en la formación de niños, niñas, jóvenes, estudiantes, profesionales y público en general, interesados en la gran variedad de temáticas relacionadas al uso y aplicación de las tecnologías libres para desarrollar habilidades necesarias en el campo educativo, laboral, jurídico, social y político.

A través de Toparquía se ofrecen recomendaciones de uso y aplicación de tecnologías libres, tomando como base la filosofía propuesta por Stallman (1985) respecto a las libertades del software libre para ejecutarlo, estudiarlo, modificarlo y redistribuirlo. Esto es, ir más allá de su uso, para conocer su código y los posibles cambios que pudieran ejecutarse bajo ciertas condiciones, con el fin de identificar nuevas funcionalidades y mayores posibilidades de control, independencia e innovación. Como factores fundamentales para promover la creatividad, inventiva y avance tanto en las instituciones públicas como privadas, mediante la formación del talento humano, el trabajo colaborativo y el aprendizaje a lo largo de la vida.

En este sentido, es importante considerar que ante las limitaciones económicas y de infraestructura que generalmente prevalecen en los países menos desarrollados, las tecnologías libres ofrecen una vía para acceder, conocer, utilizar e innovar. De ahí la importancia de la selección de las tecnologías necesarias en una sociedad que procure el mayor bienestar de sus ciudadanos. Debe llevarse a cabo un proceso de reflexión crítica sobre la ciencia y la tecnología como fuentes de "progreso" sin perder de vista la dependencia o costo que pueden generar a largo plazo, en términos económicos, sociales, ambientales o de soberanía.

Por lo tanto, Toparquía mediante los cursos en línea ofrece espacios de formación, discusión y reflexión encaminados a metas nacionales viables, para visualizar las tecnologías requeridas para alcanzarlas. Entendiendo que, instancias más amplias pueden realizar un filtrado o evaluación donde participen todos los sectores involucrados (Parlamento, trabajadores experimentados, estudiantes universitarios, instituciones y centros de investigación, universidades, comunidades, entre otros) a nivel de objetivos generales e implicaciones y también de proyectos específicos, para la definición de criterios que conduzcan a tomar las mejores decisiones en el uso de las tecnologías libres de acuerdo a los intereses de la nación enmarcados principalmente en la Constitución.

Reflexiones finales

A modo de cierre, como lo expresa Manuel Castells (citado en Himanen, 2001), la transparencia y accesibilidad que caracterizan a las tecnologías libres están estrechamente

relacionadas con la ética que debe prevalecer en esta era de la cuarta revolución industrial como dimensión del cambio social, político y económico.

En este sentido, como se ha evidenciado en este escrito, los cursos de Toparquía representan un espacio de formación híbrida, síncrono y asíncrono, que facilita al público en general e instituciones una oportunidad de acceso y actualización en relación a los diversos proyectos que se desarrollan en CENDITEL: metodologías colaborativas, aplicaciones informáticas y sistemas de gestión, entre otras. Difundiendo en un formato abierto y sencillo la variedad de contenidos de cada curso, por medio del uso de editores de imágenes, textos, videos y paquetes didácticos; basados en herramientas de libre licenciamiento, contribuyendo de esta forma a la apropiación de un estilo tecnológico solidario y autónomo, así como también al fortalecimiento del talento humano y a la soberanía tecnológica.

Referencias

Chamilo. (2024). *Plataforma de e-learning Chamilo*. Consultado el 22 de octubre de 2026, desde https://chamilo.org/es/chamilo/

Derecho Informático CENDITEL. (s.f.). *Licencia de contenidos*. Consultado el 22 de octubre de 2026, desde http://derechoinformatico.cenditel.gob.ve/licencia-de-contenido/

Himanen, P. (2001). *La ética del hacker y el espíritu de la era de la información*. http://eprints.rclis.org/12851/1/pekka.pdf

Moodle. (2022). *¿Qué es un LMS? Explicación de los sistemas de gestión del aprendizaje*. Consultado el 22 de octubre de 2026, desde https://moodle.com/es/noticias/que-es-un-lms-learning-management-systems-explicated/

Osorio, A., Montilla, K., y Morales, M. (2026). *Metodología para el desarrollo colaborativo de software libre* (3.ª ed.). Cenditel.

Repositorio de Certificados Digitales de Cenditel. (s.f.). *Certificados digitales*. Consultado el 22 de octubre de 2026, desde https://www.cenditel.gob.ve/certificados

Rondón, Y. (2024). Docencia e investigación mediada por recursos educativos abiertos. En *Conocimiento libre ante la dominación tecnológica: Desentrañando el capitalismo cognitivo*. Cenditel. https://convite.cenditel.gob.ve/files/2023/11/Libro2023.pdf

Seguridad de la Información CENDITEL. (s.f.). *Murachí: Firma electrónica*. Consultado el 22 de octubre de 2026, desde https://seguridad.cenditel.gob.ve/proyectos/murachi/

Servicio Web Gestión Organizacional CENDITEL. (s.f.). *Servicio Web Gestión Organizacional*. Consultado el 22 de octubre de 2026, desde https://www.cenditel.gob.ve/portal/servicio-web-gestion-organizacional/

Stallman, R. (1985). *El Manifiesto de GNU*. Consultado el 22 de octubre de 2026, desde https://www.gnu.org/gnu/manifesto.es.htm

Toparquía. (2026). *Plataforma educativa Toparquía*. Consultado el 22 de octubre de 2026, desde https://cursos.cenditel.gob.ve/

Tecnologías Libres aplicadas a la gestión pública y social



Autonomía cognitiva y Tecnologías Libres en la gestión de empresas de triple impacto

María Alejandra Rujano[1]

Introducción

En un contexto donde la crisis climática, la desigualdad social y la fragilidad económica se profundizan de manera simultánea, el modelo empresarial tradicional centrado en la maximización de la rentabilidad financiera ha mostrado sus límites y su complicidad con la reproducción de estos desequilibrios. Ante este escenario, el concepto de empresa sostenible, entendida como aquella que adopta el paradigma del triple impacto (económico, social y ambiental) propuesto por Elkington (1998), ha surgido como una alternativa prometedora. Este enfoque redefine el éxito organizacional a través del triple resultado, un criterio que evalúa de manera conjunta el valor económico generado, la equidad social alcanzada y la regeneración ambiental promovida.

Sin embargo, existe una dimensión relevante que suele permanecer invisible en los análisis sobre estas empresas, relacionada a la infraestructura tecnológica sobre la que operan. Al respecto, vale la pena preguntarse ¿de qué sirve una empresa que declara su compromiso ambiental si sus servidores, algoritmos y plataformas de gestión dependen de software privativo diseñado para la obsolescencia programada?; ¿cómo puede una organización afirmar que contribuye a la equidad social si el conocimiento sobre sus propios procesos de decisión permanece encerrado en sistemas que no se pueden auditar?; o ¿es posible hablar de autonomía económica cuando los recursos se invierten anualmente en licencias de software y servicios en la nube controlados por proveedores transnacionales?. Estas preguntas no son únicamente técnicas, son condiciones políticas y epistemológicas para que el triple impacto sea verificable y no una declaración de intenciones.

Este ensayo sostiene que la infraestructura tecnológica constituye una arquitectura conceptual, entendida como un conjunto de artefactos, protocolos y sistemas que condicionan qué puede ser conocido, medido, interpretado y decidido por la organización. Por ello, elegir tecnologías libres o privativas deja de ser una decisión instrumental para convertirse en una decisión epistémica y soberana con consecuencias directas sobre la viabilidad del triple impacto. El propósito central es comprender la infraestructura tecnológica como la dimensión epistemológica del triple impacto y la autonomía cognitiva como la capacidad de construir sistemas de pensamiento híbridos bajo una gobernanza consciente de la interdependencia tecnológica. La hipótesis que se desarrolla es que las tecnologías libres

[1]Ingeniero Industrial egresada de la Universidad Yacambú, con Maestría en Modelado en Simulación de Sistemas (ULA), Doctora en Gestión para la Creación Intelectual y candidata a Doctora en Ciencias Organizacionales. Actualmente se desempeña como Investigadora en el Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL). Cuenta con experiencia como autora y editora de publicaciones académicas y de divulgación científica. mrujano@cenditel.gob.ve

amplían las condiciones de posibilidad de esta autonomía, pero no la garantizan por sí solas. El ensayo es de carácter teórico-programático, porque no busca documentar una realidad consumada ni presentar resultados empíricos, se enfoca en delinear una trayectoria posible para las empresas de triple impacto, con especial atención al contexto venezolano y latinoamericano.

Para avanzar en este camino, conviene recuperar el pensamiento de Oscar Varsavsky, químico, matemático y pensador argentino que anticipó el debate actual sobre soberanía tecnológica. En *Ciencia, política y cientificismo*, Varsavsky (1969) advirtió contra el cientificismo, entendido como la adopción acrítica de métodos, teorías y tecnologías producidas en los países centrales, asumidas como neutrales y universalmente válidas, sin cuestionar su pertinencia para las necesidades concretas de las naciones periféricas. Para el autor, este fenómeno constituía una forma de dependencia cultural y política que limitaba la capacidad de América Latina para definir sus propios rumbos de desarrollo.

En *Estilos tecnológicos*, Varsavsky (2013) avanzó hacia una dimensión propositiva, en la que cada sociedad u organización con vocación transformadora tiene el derecho y la necesidad de construir su propio estilo tecnológico. Este concepto no se refiere a una lista de máquinas o programas informáticos, sino a las formas de organizar el trabajo, de relacionarse con el conocimiento y de definir qué problemas merecen resolverse primero. Bajo esta mirada, optar por plataformas cerradas o abiertas, por servidores remotos o infraestructura propia, por dispositivos de obsolescencia programada o por equipos reparables, implica una carga política inevitable.

Desde la concepción de la Free Software Foundation, el software libre se define por cuatro libertades esenciales: la posibilidad de ejecutar el programa con cualquier propósito, de examinar su funcionamiento y adaptarlo, de redistribuir copias, y de mejorarlo y difundir esas mejoras públicamente (Stallman, 2002). Estas libertades ofrecen un contrapeso frente al cientificismo varsavskiano, pues al hacer transparente, modificable y auditable la infraestructura tecnológica, la transforman en un campo maleable. La organización puede así dejar de traducir sus necesidades reales al lenguaje restrictivo de una plataforma ajena y reconfigurar sus instrumentos digitales para responder a las particularidades de su entorno.

Ahora es necesario precisar el constructo de autonomía cognitiva para evitar confundirlo con independencia tecnológica. En los ecosistemas contemporáneos, las organizaciones de cualquier tipo difícilmente pueden aspirar a la autarquía tecnológica total, porque lo pertinente es sostener una dependencia deliberada, controlada, precisa y especializada. Se define aquí la autonomía cognitiva como la capacidad de una organización para dirigir estratégicamente su conocimiento y sus procesos de toma de decisiones, preservando la soberanía sobre la formulación del problema, el criterio de evaluación, la interpretación de los resultados, el propósito organizacional y la decisión final, aun utilizando tecnologías, conocimientos y servicios de terceros. La tecnología puede ampliar la capacidad cognitiva de la organización sin sustituir su agencia intelectual; por ello, la prioridad no es evitar la dependencia, sino gobernarla. Esta noción es coherente con la interdependencia que Escobar

(2018) plantea al entender la autonomía como capacidad de diseñar las propias condiciones de existencia en relación con otros.

La autonomía cognitiva tampoco debe asociarse con aislamiento epistemológico. Desde una perspectiva universal del conocimiento, consiste en la capacidad de interactuar con conocimientos, tecnologías y epistemologías de múltiples procedencias, seleccionándolos, contrastándolos, contextualizándolos y resignificándolos desde propósitos propios. La apertura al conocimiento global es compatible con la soberanía intelectual cuando existe criterio para apropiarlo críticamente, en el marco de una ecología de saberes que articula distintas formas de conocimiento en función de los problemas locales (Santos, 2009).

En la práctica, gobernar la interdependencia supone cumplir cinco criterios de gobernabilidad: comprensión suficiente de las herramientas utilizadas, capacidad de contrastar sus resultados con criterios propios, gobernanza sobre los datos, posibilidad real de migración y responsabilidad final sobre las decisiones. Estos criterios, que se retoman a lo largo del ensayo, permiten evaluar tanto tecnologías libres como privativas y evitan un determinismo tecnológico que ignore grados, matices y estrategias intermedias.

En este marco resulta enriquecedor incorporar la noción de pensamiento híbrido humano-tecnología. La integración de Inteligencia Artificial (IA), algoritmos, analítica avanzada y sistemas predictivos permite concebir organizaciones que producen conocimiento mediante la articulación entre capacidades humanas y tecnológicas. La cuestión radica en aprender a gestionar y controlar la dependencia, al definir qué funciones cognitivas pueden delegarse y cuáles requieren supervisión humana, cómo se contrastan los resultados y dónde permanece la responsabilidad decisional. La gobernanza cognitiva se entiende aquí como una arquitectura organizacional para regular esa articulación entre inteligencias y supone precisar quién formula las preguntas, quién selecciona y valida los datos, quién establece los criterios de pertinencia, qué se delega a la tecnología, cómo se auditan e interpretan sus resultados y quién asume finalmente la decisión. Así, la autonomía cognitiva se expresa como capacidad de gobernar la interdependencia tecnológica, más que como ausencia de ella.

Esta propuesta se fundamenta en la noción de estilo tecnológico (Varsavsky, 2013) y dialoga con los debates sobre autonomía y soberanía epistémica (Escobar, 2018; Santos, 2009). Su contribución original reside en vincular esta perspectiva con la infraestructura tecnológica de las empresas de triple impacto y en proponer la gobernanza cognitiva como arquitectura organizacional para regular la cooperación entre inteligencias humanas y tecnológicas.

Para articular este enfoque, el ensayo se organiza en tres dimensiones interdependientes. La primera aborda la autonomía económica y gobernanza de la dependencia tecnológica, mostrando cómo el software libre reduce los pagos recurrentes por licencias y fortalece la resiliencia financiera. La segunda examina la democratización del conocimiento para la equidad social, a través del procomún digital y la apertura de los procesos de decisión. La tercera explora la sostenibilidad material, vinculando el hardware libre, la economía circular

y la huella ambiental hacia los objetos físicos que ejecutan el código. En el centro de estas tres dimensiones se sitúa la autonomía cognitiva, que articula la matriz de gestión de cada organización y permite al tejido productivo nacional gobernar su relación con las lógicas globales de dependencia tecnológica, en lugar de reproducirlas.

Autonomía económica y gobernanza de la dependencia tecnológica

Una empresa sostenible, de triple impacto o certificada como Empresa B, integra el valor económico, el compromiso social y la regeneración ambiental en el núcleo de su estrategia, y mide su éxito a través del bienestar de sus grupos de interés (*stakeholders*): trabajadores, comunidad y ambiente. Estos términos no son equivalentes, puesto que el triple impacto remite a un marco conceptual, mientras que la certificación como Empresa B es una de sus formalizaciones en América Latina. En ese ámbito se sitúa el Movimiento B, presente en más de 100 países y con más de 1500 empresas certificadas en América Latina (https://www.sistemab.org/), entre las cuales Venezuela registraba en 2025 seis organizaciones: Leather Heart, Casa Franceschi, Grupo Táctica, Impact Hub Caracas, Movimiento de la Arquitectura del Futuro y Sanu (Comunidad B Venezuela, 2025). Esta visión encuentra su fundamento teórico en el modelo del triple resultado de Elkington (1998), que propone evaluar el desempeño empresarial más allá de la perspectiva estrictamente financiera, equilibrando tres dimensiones interconectadas: personas (*people*), planeta (*planet*) y beneficios (*profit*). Elkington argumentaba que la métrica tradicional basada en el ingreso neto ofrece una imagen insuficiente del valor real de una empresa, pues una organización puede ser financieramente exitosa y al mismo tiempo, dañar el entorno social o ecológico en el que está inmersa.

En este tipo de organizaciones, el impacto económico trasciende la generación de ganancias para los accionistas. Variables como ingresos o gastos operativos se expanden para incorporar la inversión social, el empleo digno y la responsabilidad fiscal. Los beneficios generados para la comunidad, como la contratación de personal local o la participación de proveedores regionales, no sólo dinamizan el entorno inmediato, constituyen la base de la autonomía económica. Vukovic et al. (2025) asocian las dimensiones del triple resultado con un efecto positivo y significativo sobre el desarrollo regional, y señalan que la inversión en investigación y desarrollo ($I+D$), la creación de empresas, la reducción de la pobreza y la disminución de emisiones, contribuyen al crecimiento económico local. Asimismo, el modelo funciona como una disciplina operativa que obliga a las empresas a equilibrar sus tres dimensiones y a fortalecer aquellas áreas en las que un enfoque exclusivamente financiero genera debilidades estructurales, lo que favorece un crecimiento viable a largo plazo.

Al desarrollar capacidades técnicas y encadenamientos productivos en el territorio, la organización reduce la subordinación a patentes, software cerrado o infraestructura extranjera. En este sentido, el control sobre los activos intangibles (incluido el conocimiento técnico) y las herramientas digitales actúa como factor de resiliencia financiera. Patiño et al. (2025) concluyen que una adecuada gestión de los activos intangibles impacta positivamente en los recursos económicos de una empresa, y que medir elementos como la reputación

o el compromiso de los empleados permite tomar mejores decisiones estratégicas, hasta convertirse en una ventaja competitiva. De este modo, el conocimiento y el valor generado permanece y se reinvierte en la propia comunidad.

Esta retención del valor resulta relevante si se considera que la dependencia de tecnologías cerradas, controladas por corporaciones globales, suele traducirse en pagos recurrentes al exterior por licencias y servicios, y en una vulnerabilidad crítica ante cambios de condiciones o bloqueos externos. Frente a este riesgo, la transición hacia la soberanía tecnológica, mediante el uso de software libre, el desarrollo de capacidades técnicas internas y la soberanía de datos, puede permitir a las empresas de triple impacto conservar recursos dentro de sus comunidades. Esta vía puede fortalecer la resiliencia operativa de la organización frente a crisis externas y difundir el conocimiento técnico a nivel local. En esa medida, la autonomía tecnológica puede convertirse en un motor de sostenibilidad económica, en un modelo donde la tecnología deje de ser un mecanismo de extracción de valor y se aproxime a un bien común al servicio del bienestar social y la regeneración ambiental.

La magnitud de esta dependencia se evidencia en un rezago estructural de la región. América Latina destina en promedio menos del 1 % de su PIB a *I+D* (UNESCO, 2024), muy por debajo de países como Estados Unidos o Japón, cuya inversión se sitúa en torno al 3,4 % (Banco Mundial, 2025), lo que limita su capacidad de desarrollo tecnológico propio. A ello se suma la dependencia de servicios tecnológicos importados, que presiona la reserva de divisas y refuerza la condición de subordinación estructural. En este escenario, el software libre representa una alternativa económica directa, al eliminar o reducir los costos de licencia, puede disminuir la presión sobre las divisas y permitir que las empresas reinviertan esos recursos en capacitación local. Además, su naturaleza abierta reduce el riesgo de bloqueo tecnológico y permite que el sistema evolucione según las necesidades de la empresa, sin depender de un proveedor que modifique sus precios o condiciones. Estas ventajas tienen contrapartida, pues la adopción traslada parte del gasto a capacitación, migración y soporte, por lo que su balance debe evaluarse mediante el análisis del costo total de propiedad, que en algunos casos libera partidas presupuestarias que las licencias propietarias absorben de forma creciente y en otros exige inversiones iniciales considerables.

Cabe señalar que esta transición no implica autarquía ni rechazo absoluto a tecnologías externas. La autonomía económica en un contexto de interconexión global se mide por la capacidad de gobernar las dependencias tecnológicas, no por eliminarlas. Una empresa puede usar servicios en la nube de proveedores globales si conserva la soberanía sobre sus datos, la posibilidad de migración, la comprensión de los algoritmos que la afectan y la responsabilidad final sobre sus decisiones; aquí la dependencia se vuelve subordinada cuando la organización pierde el control sobre la formulación del problema, el criterio de evaluación o la interpretación de los resultados. Del mismo modo, la apertura del código favorece la auditabilidad, la adaptabilidad y la apropiación, pero no garantiza por sí sola la autonomía cognitiva, pues una organización puede adoptar software libre y mantener prácticas heterónomas si no desarrolla capacidades internas de comprensión, si no ejerce

gobernanza sobre sus datos o si delega acríticamente la interpretación de resultados a consultores externos. Y una tecnología propietaria no implica necesariamente heteronomía si la organización satisface los criterios de gobernabilidad definidos en la introducción. Por ello conviene distinguir entre posibilidad de auditabilidad y auditabilidad efectiva, entre acceso a la información y conocimiento, y entre transparencia técnica e inteligibilidad epistemológica.

La administración pública de distintos países ha funcionado como un campo de experimentación a gran escala. La Tabla 1 sintetiza casos ilustrativos de políticas y organizaciones que han adoptado tecnologías libres que, aunque en su mayoría corresponden al ámbito estatal, permiten extraer lecciones para las empresas de triple impacto.

Tabla 1: Casos ilustrativos de soberanía tecnológica.

Caso	Descripción	Lección relevante
En 2000, Brasil impulsó políticas en software libre (Moreno, 2026)	Brasil fue pionero en la región en articular un movimiento social por el software libre, con políticas públicas que impulsaron su adopción en la administración pública y el sector educativo.	Ilustra cómo una estrategia de soberanía tecnológica puede generar empleo cualificado, fortalecer el ecosistema local y permitir innovaciones propias.
En 2003, la ciudad de Múnich en Alemania inició el proyecto LiMux (Adach, 2024)	Múnich migró más de 15.000 puestos de trabajo a Linux y OpenOffice, siendo uno de los primeros casos a gran escala en una administración pública europea.	Muestra la viabilidad técnica de la migración a gran escala y los ahorros económicos. Aunque tuvo altibajos, sentó las bases para los casos posteriores en Europa.
En 2004, el Decreto 3990 en Venezuela estableció el uso prioritario del software libre (CNTI, 2016)	Tras el sabotaje a PDVSA en 2002, Venezuela estableció de manera oficial y obligatoria el fomento, adopción y uso del software libre en la administración pública, en favor de la independencia tecnológica. El decreto fue complementado por la Ley de Infogobierno en 2013.	Ejemplo latinoamericano de cómo una crisis de dependencia puede transformarse en una política de soberanía tecnológica. Es uno de los casos más tempranos y ambiciosos de la región, que ha influido en otras políticas públicas.
En 2007, el modelo cooperativo de Gcoop en Argentina impulsa la soberanía tecnológica (Bucca, 2024)	Cooperativa de software libre con más de 19 años de experiencia que ofrece a sus clientes independencia tecnológica, menor costo de implementación y mantenimiento, y control del código.	Modelo de negocio basado en tecnologías libres que genera empleo cualificado y valor local, además ilustra la viabilidad de proveedores locales de servicios.
Entre 2024, el estado Schleswig-Holstein en Alemania comenzó la transición a código abierto (Voss, 2026)	El estado alemán está reemplazando tecnologías de grandes consorcios por modelos de software libre, con una estrategia que incluye la migración de 60.000 puestos de trabajo a Linux, la sustitución de Microsoft Office por LibreOffice y la migración de 44.000 buzones de correo a Open-Xchange y Thunderbird.	Indica que el software libre puede constituir una decisión estratégica para administraciones de gran tamaño. Además, la migración puede generar ahorros significativos y reinversión en el ecosistema local.
En 2025, las ciudades de Copenhague y Aarhus en Dinamarca migran a software libre (Pomeyrol, 2025)	El Ministerio de Digitalización de Dinamarca anunció la migración gradual de Microsoft Office a LibreOffice y de Windows a distribuciones GNU/Linux, buscando independencia de proveedores transnacionales. La ciudad de Copenhague vio su factura con Microsoft crecer un 72 % en cinco años, lo que motivó la decisión.	Muestra que la preocupación por la dependencia de proveedores transnacionales no es exclusiva de países periféricos.

Fuente: Elaboración propia (2026).

Como se observa, de estos casos surgen tres lecciones importantes: la migración solo se

sostiene con respaldo político y organizacional continuo, como sugiere la reversión de LiMux; el éxito depende de capacidad técnica interna y de proveedores locales, como ilustran los casos de Brasil y Gcoop; y la motivación inicial (una crisis de dependencia en Venezuela, el aumento de costos en Copenhague, la búsqueda de soberanía en Schleswig-Holstein) condiciona el diseño de la transición. Dado que casi todos los casos son públicos, su transferencia a las empresas exige cautela, pues difieren la escala, los incentivos y las restricciones presupuestarias. El caso venezolano, además, invita a preguntar en qué medida el marco normativo de 2004 se tradujo en adopción efectiva, en particular fuera de la administración pública.

Si bien la literatura documenta la implementación del triple resultado en empresas de diversos sectores, la dimensión tecnológica permanece poco explorada. En la revisión realizada, no se identificaron estudios sobre empresas de triple impacto que hayan adoptado explícitamente tecnologías libres como estrategia de autonomía. Esta ausencia sugiere un vacío en la literatura, aunque no prueba la inexistencia de casos. Larner et al. (2017) documentan un antecedente cercano en el *open source guild* en Inglaterra, que explora la combinación de principios de código abierto con sostenibilidad empresarial. Para las empresas venezolanas de triple impacto, documentar esta migración sería una contribución pionera y un ejercicio de autonomía cognitiva sobre su propia infraestructura.

Algunas empresas de América Latina y Europa, aunque no se autodenominen empresas de triple impacto, ya han recorrido parte de este camino. En México, AMMISA, una distribuidora de acero, necesitaba un sistema adaptado a la legislación local con un costo accesible para una *pyme*, y el software libre de gestión le brindó una solución a medida que impulsó el crecimiento de sus ventas. En España, Offerum, un minorista en línea, incorporó módulos de contabilidad, finanzas y gestión de compras basados en software libre, lo que le permitió aumentar el volumen de transacciones sin ampliar su estructura organizativa, y reducir costos y errores (Martínez, 2013). Al tratarse de relatos divulgativos no evaluados, estos casos tienen un valor ilustrativo, porque sugieren que la adopción de tecnologías libres puede asociarse con mejoras operativas en plazos breves, sin permitir atribuirlas causalmente a la tecnología.

Para las empresas venezolanas de triple impacto, estas experiencias sugieren un horizonte que combina proveedores locales de software libre, modelos cooperativos y soberanía sobre los datos. La adopción de tecnologías libres puede permitirles reducir los pagos por licencias privativas y reinvertir esos recursos en su misión social o ambiental. Asimismo, puede disminuir su exposición a decisiones unilaterales de proveedores extranjeros. Al contratar desarrolladores y servicios de software libre nacionales, pueden contribuir a la creación de empleo cualificado y al desarrollo de capacidades tecnológicas locales, con efectos sobre la salida de divisas y el ecosistema productivo nacional. Además, el software libre permite adaptar las herramientas a las particularidades del contexto venezolano, en lugar de asumir lógicas de gestión diseñadas en otros países. La viabilidad de esta ruta depende de condiciones que deben evaluarse en cada caso, entre ellas la disponibilidad de talento técnico, la conectividad y la estabilidad de la infraestructura.

Esta adaptación no debería confundirse con aislamiento. Desde la perspectiva global del conocimiento planteada en la introducción, las empresas de triple impacto pueden y deben interactuar con tecnologías, metodologías y epistemologías de múltiples procedencias, seleccionando críticamente lo que resulte pertinente para sus propósitos. La soberanía intelectual no reside en el rechazo de lo externo, sino en la capacidad de apropiación crítica y de resignificación contextual.

Más allá de cada organización, esta transición tiene efectos sobre el mercado tecnológico. Al prestarse como servicio y no como licencia, el software libre puede ampliar la competencia entre las compañías que brindan soporte y facilitar el acceso a la tecnología. Los formatos abiertos favorecen la interoperabilidad y reducen la dependencia de regalías a terceros. En términos de seguridad, el acceso al código fuente facilita que auditores independientes y la comunidad de desarrolladores examinen los programas y reduce el riesgo de funcionalidades ocultas, aunque no lo elimina. Estas ventajas refuerzan una consideración de coherencia, dado que resulta difícil conciliar el compromiso con la equidad social con que los recursos tecnológicos se canalicen sistemáticamente hacia licencias de proveedores transnacionales sin evaluar alternativas. Adoptar tecnologías libres es una vía para alinear la práctica con los principios de justicia social y autonomía económica que el triple impacto promueve, siempre que se cumplan los criterios de gobernabilidad. Sin embargo, la autonomía económica resulta insuficiente si el conocimiento sobre los procesos de decisión permanece cerrado, lo que conduce a la dimensión social del problema.

Democratización del conocimiento para la equidad social

La equidad social que promete el triple impacto exige democratizar del conocimiento organizacional. La autonomía cognitiva adquiere aquí su dimensión más política, porque implica que los trabajadores y las comunidades afectadas por las decisiones empresariales puedan comprender, auditar y participar en los procesos que las generan. Un marco útil para pensar esta apertura es el concepto de procomún desarrollado por Ostrom (1990), quien mostró que las comunidades pueden organizarse voluntariamente para gestionar recursos compartidos de forma sostenible, sin necesidad de un control estatal centralizado ni de una privatización total. Aunque Ostrom trabajó principalmente sobre recursos naturales, su marco ha sido extendido al ámbito digital por autores como Benkler (2001), quien sostiene que la producción entre pares basada en código abierto constituye un modo de organización económico alternativo a los modelos jerárquicos corporativos.

El procomún digital, entendido como el espacio de producción colaborativa entre iguales, trasciende la idea de un repositorio de recursos para convertirse en un ecosistema donde el conocimiento se produce de manera abierta, participativa y descentralizada (Escaño, 2017). El software libre puede entenderse como una forma de organizar el trabajo intelectual que resiste la lógica de apropiación privada, al crear procomunes sostenibles que permiten el intercambio y la colaboración sin exclusión. Las empresas de triple impacto que adoptan esta lógica podrían construir prácticas de gestión abiertas, en las que los trabajadores

participen en la definición de indicadores de sostenibilidad, las comunidades auditen los impactos sociales y ambientales, y el conocimiento generado se convierta en un bien común que fortalezca el tejido social.

Desde la perspectiva varsavskiana, esta apertura cobra una dimensión relevante para América Latina. El cientificismo no solo impone tecnologías ajenas, también formas de saber que pueden invisibilizar los problemas locales. Un software de gestión desarrollado en otro contexto incorpora supuestos sobre qué se mide, cómo se clasifica y qué se prioriza (por ejemplo, indicadores de rentabilidad o plantillas de evaluación de personal diseñadas para otros marcos laborales). El acceso al código permite que quienes conocen los problemas concretos del territorio lean, modifiquen y adapten esos supuestos.

Sin embargo, esta posibilidad no opera de manera automática. El acceso al código fuente es una condición necesaria, pero no suficiente. Para que la auditabilidad sea efectiva, se requieren capacidad técnica instalada, tiempo organizacional destinado a la revisión, incentivos para la participación y una cultura de transparencia que no siempre existe. La apertura del código puede convertirse en una nueva forma de opacidad si los trabajadores carecen de las competencias para interpretarlo o si la dirección monopoliza la lectura de sus implicaciones. La transparencia técnica no equivale a inteligibilidad epistemológica, pues un código puede ser visible pero incomprensible para quienes no poseen el marco conceptual para interpretarlo.

En el extremo opuesto se sitúa la opacidad de muchos sistemas privativos, cuyos algoritmos de gestión, fórmulas de evaluación de desempeño y protocolos de decisión suelen estar protegidos por capas de propiedad intelectual que limitan su examen. Para una empresa de triple impacto, esto plantea una tensión: ¿cómo puede auditar su propio impacto social si no puede examinar las herramientas que lo miden?, o ¿cómo puede garantizar equidad en sus procesos internos si los criterios de evaluación de su personal, de asignación de recursos o de selección de proveedores están determinados por lógicas algorítmicas inaccesibles?. Como advierte Winner (1980), los artefactos tecnológicos pueden incorporar formas de ordenamiento social que benefician a algunos actores sobre otros. Un sistema de gestión diseñado para maximizar el retorno sobre la inversión tiende a reflejar ese criterio en sus indicadores y flujos por defecto, pero si una empresa de triple impacto lo adopta sin capacidad de contrastarlo o modificarlo, corre el riesgo de importar supuestos incompatibles con su misión.

Este riesgo no se reduce a la clasificación entre libre y privativo. Una tecnología propietaria puede utilizarse de manera autónoma si la organización conserva la comprensión de sus lógicas fundamentales, la capacidad de contrastar sus resultados con criterios propios, la gobernanza sobre los datos que introduce y extrae, la posibilidad real de migración y la responsabilidad final sobre las decisiones que adopta. Del mismo modo, el software libre puede coexistir con prácticas heterónomas si no se satisfacen esos criterios. La heteronomía radica en la pérdida de agencia intelectual de la organización, con independencia de la naturaleza jurídica del software. La distinción libre/privativo es orientadora, porque el software libre

amplía las condiciones de posibilidad de la autonomía cognitiva sin garantizarlas, y no debe convertirse en un determinismo tecnológico que impida reconocer grados, matices y estrategias intermedias. La Tabla 2 sintetiza las diferencias tendenciales entre ambos modelos y las condiciones que las matizan.

Tabla 2: Diferencias tendenciales entre software privativo y libre en el marco de la autonomía cognitiva y el triple impacto.

Dimensión	Software privativo	Software libre	Condición necesaria
Acceso del código	Cerrado; acceso restringido según la licencia	Abierto; modificable y auditable	La apertura solo produce auditabilidad efectiva si existen capacidades internas
Lógica de gestión incorporada	Refleja los criterios del diseñador	Adaptable a indicadores de triple impacto	La adaptabilidad requiere gobernanza cognitiva y criterios propios
Acceso al conocimiento técnico	Concentrado en el proveedor	Distribuido entre trabajadores, comunidad y proveedores locales	El acceso a información no equivale a conocimiento sin marcos interpretativos
Auditoría de procesos	Limitada a lo que el proveedor documente o permita auditar	Posible para trabajadores y grupos de interés	La transparencia técnica no garantiza inteligibilidad epistemológica
Costo de adaptación al contexto local	Depende de la disposición del proveedor	Potencialmente menor, según la capacidad interna	Requiere inversión en capacitación y tiempo organizacional
Generación de empleo local	Soporte frecuentemente concentrado en el proveedor	Mercado potencialmente distribuido de servicios técnicos	El empleo local puede ser precario si no se desarrollan capacidades estratégicas

Fuente: Elaboración propia, a partir de Stallman (2002), Benkler (2001), Winner (1980) y Varsavsky (2013).

Ante esta opacidad, la autonomía cognitiva se convierte en la respuesta estructural necesaria, más allá de acumular datos, el valor radica en saber interpretarlos y decidir sobre ellos con criterios propios. Esta autonomía puede entenderse en cuatro niveles interdependientes. Los tres componentes del procomún (los recursos abiertos, la comunidad que participa en su producción y vigilancia, y las reglas de gobernanza colectiva (Benkler, 2001; Ostrom, 1990)) sustentan los tres primeros; a ellos se añade la gobernanza de la delegación cognitiva, propia de las organizaciones que integran IA.

En el nivel técnico-operativo, la organización controla el código fuente de sus herramientas de gestión, lo que le permite adaptar módulos específicos según criterios de triple impacto. Puede por ejemplo, integrar indicadores de huella de carbono en el inventario o ajustar la evaluación de personal con métricas de inclusión laboral, redefiniendo su lógica operativa desde la raíz. En el nivel epistemológico, la organización define qué datos recopila, cómo los clasifica y qué narrativas construye a partir de ellos. Frente a los tableros prediseñados de las plataformas corporativas, que suelen reducir el éxito a indicadores financieros, la autonomía cognitiva permite diseñar sistemas de información que integren variables sociales

y ambientales como datos de primera clase. En el nivel comunitario, la organización abre sus procesos de conocimiento a trabajadores, comunidades y otros actores sociales, para favorecer la rendición de cuentas. El software libre, al reducir las barreras de acceso al código, permite que grupos de interés examinen cómo se toman las decisiones que los afectan. Esta transparencia es una condición estructural para que el triple impacto sea verificable y no sólo declarativo.

En el nivel de la gobernanza cognitiva, la organización define quién formula las preguntas, quién selecciona y valida los datos, quién establece los criterios de pertinencia, qué funciones se delegan a sistemas automatizados o de IA y cuáles requieren supervisión humana, cómo se auditan e interpretan sus resultados y dónde permanece la responsabilidad decisional. Este nivel es especialmente relevante en un contexto donde la analítica avanzada y los sistemas predictivos pueden ampliar capacidades, pero también sustituir sin crítica la agencia intelectual si no se establecen reglas claras de cooperación entre inteligencias. La Tabla 3 ofrece una matriz con ejemplos hipotéticos que permite explicitar estas decisiones para cada función cognitiva delegada.

Tabla 3: Matriz ilustrativa de gobernanza cognitiva.

Función cognitiva	**Delegación**	**Criterio de pertinencia**	**Supervisión humana**	**Contraste de resultados**	**Responsable de la decisión**
Clasificación de proveedores según criterios de impacto	Parcial (preselección)	Comité de sostenibilidad con representación de proveedores locales	Revisión de casos límite	Comparación con evaluación manual de una muestra	Dirección de compras
Análisis predictivo de demanda	Si	Gerencia de operaciones	Validación de supuestos y datos de entrada	Contaste con series históricas	Gerencia de operaciones
Evaluación del desempeño del personal	Solo como apoyo	Recursos humanos con participación de los trabajadores	Total	Revisión con los equipos evaluados	Recursos humanos

Fuente: Elaboración propia (2026).

La democratización del conocimiento mediante el procomún digital puede tener efectos directos sobre la equidad social, siempre que se cumplan las condiciones señaladas. Puede reducir la asimetría informativa entre la dirección de la empresa y su base laboral; cuando los trabajadores tienen acceso y capacidad de interpretación, del sistema que gestiona sus horarios, salarios o evaluaciones de desempeño, la relación de poder puede redistribuirse en alguna medida. El conocimiento técnico deja de ser un privilegio de un departamento de sistemas subcontratado y pasa a ser, un recurso compartido.

A diferencia del modelo de licencias propietarias, donde el soporte técnico y la capacitación suelen concentrarse en el proveedor, este modelo puede generar un mercado distribuido de servicios, de modo que las empresas de triple impacto contraten profesionales de su propia comunidad y multipliquen el efecto social de su inversión tecnológica. Además, el procomún permite que las empresas compartan sus innovaciones con otras organizaciones del territorio sin costos de licenciamiento. Una empresa que desarrolle un módulo de gestión

de residuos reciclables, por ejemplo, podría ponerlo a disposición de cooperativas vecinas, ampliando su impacto social sin costos adicionales.

Las experiencias de la economía social apuntan a esa dirección. La cooperativa argentina Gcoop, descrita en la Tabla 1, ilustra cómo una organización puede definir sus propias herramientas digitales según sus necesidades de gestión y valores comunitarios, pues al tener acceso al código fuente, adapta los sistemas y decide qué variables medir y cómo evaluar su impacto (Bucca, 2024). Asimismo, la soberanía tecnológica como proceso formativo ha sido documentada en contextos educativos latinoamericanos (Álvarez, 2021), lo que sugiere que las organizaciones integradas en ecosistemas de conocimiento abierto no solo adquieren herramientas, también pueden desarrollar la capacidad de producir y auditar su propio conocimiento técnico.

En consecuencia, la equidad social no es un complemento del impacto económico, es una condición de su legitimidad. Una empresa que retiene recursos localmente pero excluye a su comunidad de la comprensión de sus procesos difícilmente satisface el criterio de equidad del triple impacto. Las tecnologías libres ofrecen una vía estructural para que esa equidad sea efectiva y no solo retórica, pero su alcance depende de la capacidad de la organización para gobernar el conocimiento que se abre.

Esta equidad se construye en permanente articulación. Desde la perspectiva abierta del conocimiento, las empresas de triple impacto pueden articular saberes locales con conocimientos globales, y tradiciones tecnológicas propias con innovaciones externas, en un diálogo que no jerarquice unas formas sobre otras. La autonomía cognitiva se expresa en la capacidad de seleccionar, contrastar y resignificar lo externo desde una intencionalidad propia, no en el rechazo sistemático de lo ajeno. Esa capacidad no se limita al código, también se ejerce sobre los objetos materiales que lo ejecutan, lo que conduce a la dimensión material del problema.

Sostenibilidad material: Hardware libre, economía circular y huella ambiental

Las dos secciones anteriores han establecido que la autonomía económica y la democratización del conocimiento dependen de una infraestructura que la organización pueda comprender y dirigir. Esta infraestructura no se agota en el código, porque este se ejecuta en objetos materiales cuya vida útil, reparabilidad y procedencia condicionan qué puede saberse, decidirse y sostenerse en el tiempo. El hardware es así, la dimensión material de la infraestructura de conocimiento, y con él el argumento se extiende del software a los objetos que lo ejecutan.

La industria tecnológica global es una de las cadenas productivas más intensivas en extracción de recursos naturales y generación de residuos. Los dispositivos electrónicos demandan minerales críticos, consumen cantidades crecientes de energía durante su fabricación y operación, y muchos terminan su vida útil en vertederos donde pueden

liberar sustancias tóxicas. Según Baldé et al. (2024), la generación mundial de residuos electrónicos crece unas cinco veces más rápido que su reciclaje documentado, y para 2030 se prevé un aumento del 32 %, hasta unos 82 millones de toneladas anuales. Esta dinámica implica además la pérdida de materiales de alto valor estratégico, y el reciclaje de residuos electrónicos satisface apenas el 1 % de la demanda mundial de elementos de tierras raras (Baldé et al., 2024). Este problema responde a factores estructurales de diseño, consumo y regulación, y no sólo a límites técnicos.

Entre esos factores figura la obsolescencia programada, entendida como el diseño que limita la vida útil de un producto. Cuando una empresa de triple impacto adquiere servidores, estaciones de trabajo o dispositivos difíciles de reparar, adopta una lógica de renovación acelerada que resulta difícil de conciliar con su compromiso ambiental. Como se indicó con Winner (1980) en la sección anterior, los artefactos incorporan criterios de diseño, y en este caso el criterio incorporado favorece el recambio frente al durabilidad. El software puede reforzar esta dinámica cuando restringe actualizaciones en equipos antiguos o condiciona el funcionamiento a licencias temporales. Por lo tanto, la autonomía cognitiva no puede detenerse en el código, debe extenderse a los objetos que lo ejecutan.

El hardware libre puede entenderse a través de varias dimensiones clave. Por un lado, es abierto, cuyas especificaciones técnicas, esquemas de circuitos y manuales de reparación son públicos y modificables, y que constituye la contraparte material del software libre. Asimismo, es modular y reparable, que facilita el mantenimiento y la actualización aunque no publique sus diseños; y es compatible con estándares abiertos y software libre, que evita la dependencia de un único proveedor. Proyectos como Open Source Ecology (https://www.opensourceecology.org/) o Fairphone (https://www.fairphone.com/) muestran que es viable diseñar tecnología modular, reparable y actualizable, donde el usuario conserva la capacidad de gestionar la vida útil del dispositivo. La disponibilidad de hardware abierto para servidores y estaciones de trabajo es hoy limitada, por lo que en la práctica la estrategia más accesible para una empresa suele combinar equipos reparables, estándares abiertos y reacondicionamiento.

Con cualquiera de estas opciones, la organización adquiere mayor capacidad de reparar, actualizar y recircular sus equipos sin depender del ciclo de reemplazo impuesto por el fabricante. Esto reduce la generación de residuos electrónicos, disminuye la demanda de nuevos dispositivos con su correspondiente huella de extracción minera, y alarga la vida útil de los activos tecnológicos. Desde la perspectiva de Varsavsky (2013), esta elección forma parte del estilo tecnológico, pues define cómo la organización se relaciona con la materia, con el trabajo de mantenimiento y con la temporalidad de sus herramientas. Un estilo tecnológico soberano no es el que acumula la tecnología más reciente, es el que decide cuándo, cómo y por qué reemplazar una herramienta.

El movimiento por el derecho a reparar (*right to repair*) que ha avanzado legislativamente en la Unión Europea y en varios estados de Estados Unidos, respalda esta orientación desde el ámbito regulatorio (Calboli, 2023). Para las empresas venezolanas de triple impacto, la

adopción de prácticas de reparabilidad no necesita esperar a la legislación y puede ser una decisión proactiva que alinee la infraestructura material con los principios declarados. En contextos donde la importación de repuestos es costosa o incierta, la reparabilidad y la adaptación local de los equipos son además una estrategia de continuidad operativa.

La huella ambiental de la infraestructura tecnológica también se traslada a la nube. Cuando una empresa contrata servicios de almacenamiento y procesamiento en servidores de terceros, no elimina el impacto ambiental asociado, lo traslada a centros de datos que consumen grandes cantidades de energía y requieren volúmenes considerables de agua para refrigeración. Masanet et al. (2020) estiman que el consumo energético de los centros de datos creció alrededor de un 6 % entre 2010 y 2018, mientras que la capacidad de cómputo aumentó en una proporción mucho mayor, lo que refleja tanto la magnitud del consumo como el peso de las mejoras de eficiencia. Para las empresas de triple impacto, depender de proveedores externos plantea algunas tensiones. Económicamente, mantiene pagos recurrentes al exterior; epistemológicamente, puede reducir el control sobre sus propios datos, con efectos sobre la autonomía cognitiva; y ambientalmente, traslada la huella a infraestructuras sobre las cuales la organización tiene poca visibilidad.

La alternativa de servidores locales, alimentados con energías renovables y gestionados con software libre, permite asumir responsabilidad directa sobre ese impacto, pero no está exenta de tensiones. Una infraestructura local puede tener una huella mayor si depende de energías fósiles o si carece de las economías de escala en eficiencia energética de los grandes centros de datos, y su viabilidad depende de factores como la estabilidad eléctrica y la conectividad. Por tanto, la decisión debe basarse en un análisis contextual que pondere el origen de la energía, la vida útil de los equipos, la posibilidad de reparación y el impacto agregado. Bajo este criterio, una solución híbrida puede ser más racional de una opción única, siempre que la organización conserve la soberanía sobre sus datos, la transparencia sobre su huella y la posibilidad de migrar. La sostenibilidad material constituye un ejercicio de gobernanza técnica y ambiental que requiere información, criterio y responsabilidad.

La economía circular, entendida como un modelo de producción y consumo que implica compartir, reutilizar, reparar y reciclar materiales y productos durante el mayor tiempo posible (Arin, 2017), encuentra en las tecnologías libres un apoyo técnico. Cuando el código es abierto, los equipos antiguos pueden ser reutilizados con sistemas operativos livianos que les otorgan una segunda vida funcional. Cuando el hardware es modular, los componentes defectuosos pueden ser reemplazados sin descartar el conjunto. Cuando los diseños son públicos, las comunidades locales pueden fabricar repuestos adaptados o recircular componentes entre organizaciones vecinas.

Esta lógica se vincula con el procomún de Ostrom (1990), que a diferencia de los recursos naturales, el conocimiento sobre cómo reparar un dispositivo no se agota con el uso, sino que puede ampliarse al compartirse. Una empresa de triple impacto que documenta y comparte sus protocolos de mantenimiento, sus adaptaciones de hardware o sus sistemas de gestión de residuos electrónicos contribuye a un procomún material que beneficia al tejido productivo

territorial. Esta práctica transforma la gestión ambiental de un costo privado en un bien colectivo, coherente con la lógica del triple impacto.

Además, la economía circular tecnológica permite que las empresas de triple impacto integren a recicladores, reparadores y técnicos locales en su cadena de valor. En lugar de externalizar la gestión de residuos a servicios poco transparentes, la organización puede establecer alianzas con cooperativas de recicladores para la recuperación de componentes electrónicos. Esto no solo reduce la huella ambiental, puede generar empleo digno, retener valor en la comunidad y visibilizar una cadena productiva históricamente asociada a la informalidad. En este sentido, el hardware libre y la economía circular no son estrategias de mitigación ambiental, son vías de inclusión productiva.

Para cerrar este apartado, la sostenibilidad material de la infraestructura tecnológica se evalúa por la capacidad de la organización para gobernar sus interdependencias materiales y energéticas. Una empresa de triple impacto puede usar componentes importados si conserva la capacidad de repararlos, actualizarlos y recircularlos, y puede usar servicios en la nube si tiene transparencia sobre su huella y soberanía sobre sus datos. En su dimensión material, la autonomía cognitiva es la capacidad de decidir conscientemente sobre la vida útil, la procedencia y el destino de los artefactos que sostienen el conocimiento organizacional.

Consideraciones finales

Este ensayo planteó que la infraestructura tecnológica de una organización es una arquitectura epistemológica que condiciona qué puede ser conocido, medido, interpretado y decidido, por lo que elegir entre tecnologías libres y privativas es una decisión epistémica y no solo instrumental. Para evaluar esa decisión en las empresas de triple impacto, propuso la autonomía cognitiva como criterio, entendida como la capacidad de gobernar una dependencia tecnológica deliberada y controlada, y no de eliminarla.

El análisis de las tres dimensiones sugiere que la autenticidad del triple impacto depende también de la infraestructura tecnológica sobre la cual la organización construye su operación cotidiana, y no solo de la buena voluntad empresarial o de las certificaciones obtenidas. En la dimensión económica, las tecnologías libres pueden reducir los pagos recurrentes por licencias y la exposición a decisiones unilaterales de proveedores, siempre que la organización asuma los costos de migración, capacitación y soporte. En la dimensión social, pueden ampliar la posibilidad de que los trabajadores y comunidades comprendan y auditen los procesos que los afectan, siempre que existan capacidades, tiempo e incentivos para hacerlo. En la dimensión material, la reparabilidad, los estándares abiertos y la economía circular permiten decidir sobre la vida útil, la procedencia y el destino de los equipos, con las restricciones de disponibilidad y de contexto señaladas.

Estas dimensiones constituyen una matriz de gestión donde cada eje refuerza y condiciona a los demás, pues avanzar en una sin las otras produce logros parciales. Una empresa que reduce sus pagos de licencias, pero no desarrolla capacidad para comprender y adaptar sus

sistemas, no gana autonomía cognitiva. Una organización que abre su código, pero renueva sus equipos sin criterio de durabilidad, no resuelve su huella material. Una compañía que repara dispositivos, pero cede sin control sus datos a proveedores externos, mantiene una dependencia que su compromiso ambiental no compensa.

Un resultado central es que la distinción entre lo libre y lo privativo es orientadora, pero no determinante. La apertura del código favorece la auditabilidad, la adaptabilidad y la apropiación, pero no garantiza por sí sola la autonomía cognitiva; del mismo modo, una tecnología propietaria no implica necesariamente heteronomía si la organización satisface los cinco criterios de gobernabilidad: comprensión suficiente, capacidad de contraste, gobernanza sobre los datos, posibilidad real de migración y responsabilidad sobre las decisiones. Por ello resulta necesario diferenciar la posibilidad de auditabilidad de la auditabilidad efectiva, el acceso a la información del conocimiento, y la transparencia técnica de la inteligibilidad epistemológica. Estos criterios y los cuatro niveles de autonomía descritos constituyen una primera operacionalización del concepto, que debe contrastarse empíricamente.

En el escenario socioeconómico actual, cualquier organización está abocada a utilizar tecnologías, conocimientos y servicios de múltiples procedencias. La autonomía se expresa en la capacidad de definir qué funciones cognitivas se delegan a sistemas híbridos humano-tecnología, cuáles requieren supervisión humana, cómo se contrastan sus resultados y dónde recae la decisión. La gobernanza cognitiva, en tanto arquitectura organizacional para regular la cooperación entre inteligencias, es el mecanismo concreto mediante el cual la autonomía se realiza, pues su alcance excede la disyuntiva libre/privativa y requiere un tratamiento propio en investigaciones futuras. Desde una perspectiva abierta del conocimiento, la autonomía cognitiva no supone rechazo de lo externo, sino capacidad de seleccionarlo, contrastarlo, contextualizarlo y resignificarlo desde propósitos propios.

Como sostuvo Varsavsky (2013), la elección de un estilo tecnológico expresa el tipo de desarrollo que una sociedad desea para sí misma. Para las empresas venezolanas de triple impacto, esta decisión rebasa lo técnico o comercial, implica definir qué relación quieren establecer con el conocimiento, con los proveedores y con los objetos que sostienen su operación. Las tecnologías libres no garantizan por sí solas la justicia social ni la regeneración ambiental, pero pueden ampliar las condiciones para que la organización comprenda, adapte y responda por su infraestructura. Que esa ampliación se traduzca en autonomía cognitiva dependerá de las capacidades y de la voluntad de gobernarla.

Referencias

Adach, O. (2024). *Munich's Long History with Open Source in Public Administration*. Consultado el 19 de octubre de 2026, desde https://interoperable-europe.ec.europa.eu/collection/open-source-observatory-osor/document/munichs-long-history-open-source-public-administration

Álvarez, S. (2021). El docente como decisor en la apropiación de las tecnologías digitales para la intervención didáctica: los beneficios de la soberanía tecnológica desde el paradigma libre. *Innovaciones Educativas*, *23*, 110-119. https://doi.org/10.22458/ie.v23iEspecial.3608

Arin, A. (2017). Nuevas economías transformadoras. *Revista Vasca de Economía Social*, *14*, 7-60. https://doi.org/10.1387/reves.19505

Baldé, C., Deubzer, O., Goldizen, F., Forti, V., Kuehr, R., Nnorom, I., Oelofse, S., y Wagner, M. (2024). *The Global E-waste Monitor 2024: Electronic waste management, environmental impacts, and circular economy opportunities*. United Nations Institute for Training y Research (UNITAR) & International Telecommunication Union (ITU). https://ewastemonitor.info/

Banco Mundial. (2025). *Gasto en investigación y desarrollo (% del PIB)*. https://datos.bancomundial.org/indicador/GB.XPD.RSDV.GD.ZS?locations=US

Benkler, Y. (2001). La batalla por el ecosistema institucional en el entorno digital. *Comunicaciones de la ACM*, *44*(2), 84-90. https://dl.acm.org/doi/fullHtml/10.1145/359205.359235#body-6

Bucca, V. (2024). *¿Por qué ser freelancer cuando se puede construir una empresa junto a compañeros?* https://anccom.sociales.uba.ar/2024/09/11/por-que-ser-freelancer-cuando-se-puede-construir-una-empresa-junto-a-companeros/

Calboli, I. (2023). El derecho a reparar: avances recientes en los Estados Unidos. *Revista de la OMPI*. https://www.wipo.int/es/web/wipo-magazine/articles/the-right-to-repair-recent-developments-in-the-usa-56378

CNTI. (2016). *Software Libre garantiza apropiación del conocimiento tecnológico*. Centro Nacional de Tecnologías de la Información. https://cnti.gob.ve/software-libre-garantiza-apropiacion-del-conocimiento-tecnologico/

Comunidad B Venezuela. (2025). *6 empresas con certificación B en Venezuela*. https://www.instagram.com/p/DGl58GThVMO/

Elkington, J. (1998). *Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business*. New Society Publishers.

Escaño, C. (2017). Bienes comunes del conocimiento: Una propuesta de desarrollo histórico del procomún digital. *Opción*, *33*(82), 239-262. https://www.redalyc.org/pdf/310/31053180010.pdf

Escobar, A. (2018). *Designs for the pluriverse: Radical interdependence, autonomy, and the making of worlds*. Duke University Press.

Larner, J., Cheverst, K., MacDonald, M., Hoile, C., y Soutar, A. (2017). The open source guild: creating more sustainable enterprise? *Journal of Management Development*, *36*(1), 71-80. https://doi.org/10.1108/JMD-10-2014-0134

Martínez, E. (2013). *Casos de éxito de empresas que ya gestionan con software libre*. https://www.iebschool.com/hub/empresas-con-software-libre-gestion-digital-business/

Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., Smith, S., y Koomey, J. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*, *367*(6481), 984-986. https://doi.org/10.1126/science.aba3758

Moreno, A. (2026). *Soberanía productiva y tecnológica*. https://www.periodicovas.com/soberania-productiva-y-tecnologica/

Ostrom, E. (1990). *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*. Cambridge University Press.

Patiño, A., Cabello, S., Ros, D., y Urtasun, M. (2025). *Transformación digital productiva. Analisis de políticas, estrategias e instrumentos para impulsarla en América Latina* (inf. téc.). Naciones Unidas CEPAL. https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/678e47d8-cc9a-4691-8f38-eca4b74e0bb3/content

Pomeyrol, J. (2025). *Dinamarca apuesta por Linux y LibreOffice en favor de la soberanía tecnológica*. https://www.muylinux.com/2025/06/17/dinamarca-microsoft-linux-libreoffice/

Santos, B. (2009). *Una epistemología del Sur: La reinvención del conocimiento y la emancipación social*. Siglo del Hombre Editores / CLACSO.

Stallman, R. (2002). *Free Software, Free Society: Selected Essays of Richard M. Stallman*. GNU Press.

UNESCO. (2024). *El Estado de la Ciencia 2024*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. https://www.unesco.org/es/articles/el-estado-de-la-ciencia-2024

Varsavsky, O. (1969). *Ciencia, política y cientificismo*. Centro Editor de América Latina. http://docs.politicascti.net/documents/Teoricos/Varsavsky_CPC.pdf

Varsavsky, O. (2013). *Estilos tecnológicos. Propuestas para la selección de tecnologías bajo racionalidad socialista*. Biblioteca Nacional. https://repositorio.esocite.la/325/1/Varsavsky2013-EstilosTecnologicos.pdf

Voss, L. (2026). *From Early Adopter to Leader: Schleswig-Holstein's Open Source Evolution*. https://interoperable-europe.ec.europa.eu/collection/open-source-observatory-osor/news/schleswig-holsteins-open-source-strategy-year

Vukovic, D., Spitsin, V., Akerman, E., y Gammerschmidt, I. (2025). Triple Bottom Line, Sustainability, and Regional Development. *Journal of Eurasian Studies*, *16*(1), 32-43. https://doi.org/10.1177/18793665231215802

Winner, L. (1980). Do artifacts have politics? *Daedalus*, *109*(1), 121-136.

Tecnologías Libres en la gestión de proyectos de construcción

María Eugenia Acosta[1]

Introducción

La industria de la construcción ha experimentado en las últimas décadas una transformación sustancial impulsada por la incorporación de herramientas digitales orientadas a optimizar los procesos en cada una de las fases que integran el ciclo de vida de los proyectos. No obstante, gran parte de estas herramientas se desarrollan bajo esquemas propietarios, lo cual introduce limitaciones asociadas a costos de licenciamiento, dependencia tecnológica externa, limitaciones para la interoperabilidad entre sistemas y restricciones para su adaptación a contextos específicos; representando una brecha significativa para empresas de mediana y pequeña escala, así como para instituciones gubernamentales con recursos limitados. Esta situación configura un escenario de desigualdad en el acceso y uso de tecnologías avanzadas, que incide directamente en la formación, investigación y gestión en la ingeniería civil.

Frente a este panorama, las tecnologías libres emergen como una alternativa que, fundamentada en los principios de las licencias abiertas, contribuye a reconfigurar la gestión de proyectos de construcción a partir de enfoques más abiertos, flexibles y adaptables, capaces de ofrecer soluciones técnica y económicamente competitivas para la administración integral de las distintas fases que conforman un proyecto, incluyendo herramientas de diseño asistido, análisis geoespacial, simulación estructural, inspecciones y plataformas colaborativas.

Sin embargo, a pesar de su creciente relevancia, persiste un limitado marco conceptual que permita comprender de manera integrada el papel de estas tecnologías en la gestión del ciclo completo de los proyectos de construcción. En consecuencia, se hace necesario desarrollar una aproximación teórica que analice su alcance, potencialidades y limitaciones, contribuyendo a la reflexión sobre su incorporación en contextos productivos y educativos desde una perspectiva estratégica.

En correspondencia con lo anterior, el presente texto aborda el ecosistema de tecnologías libres disponible para la administración de proyectos de construcción, destacando sus posibilidades de aplicación en los ámbitos teórico y operativo. Con este propósito, se

[1]Ingeniero Civil egresada del Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño (IUPSM), MSc. en Educación Superior mención Docencia Universitaria, Doctora en Ciencias de la Educación y Postdoctora en Investigación Educativa. Actualmente se desempeña como docente en la Universidad Politécnica Territorial del Estado Mérida Kléber Ramírez (UPTM Kléber Ramírez), y como investigadora en el Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL). Autora y editora de publicaciones académicas y de divulgación científica. macosta@cenditel.gob.ve

propone una estructura analítica conformada por cinco dimensiones interrelacionadas: *diseño y modelado*, *análisis y simulación*, *planificación y gestión*, *ejecución y seguimiento*, y *evaluación y control*, las cuales abarcan las principales actividades asociadas a las etapas de un proyecto constructivo.

La relevancia del tema no se circunscribe únicamente al ámbito económico. La adopción de tecnologías libres en la construcción tiene implicaciones directas en la soberanía tecnológica de las organizaciones, la interoperabilidad entre sistemas, la calidad del dato generado a lo largo del proyecto y la capacidad de innovación del sector. Desde una perspectiva académica, su análisis contribuye al campo de la gestión de proyectos al sistematizar conocimiento disperso sobre herramientas específicas y establecer un marco conceptual que facilita su comprensión como un ecosistema integrado y coherente.

Desde la perspectiva metodológica, este trabajo es un ensayo de revisión teórico-documental de carácter analítico-propositivo, dirigido a sistematizar el estado del conocimiento sobre las tecnologías libres disponibles para la gestión de proyectos de construcción y a proponer un modelo de ecosistema integrado que articule estas herramientas a lo largo del ciclo de vida del proyecto constructivo.

La selección de fuentes se realizó bajo criterios de pertinencia temática, rigor técnico y representatividad académica, dando prioridad a artículos científicos indexados, documentación oficial de los proyectos de *software* referenciados y contribuciones de organismos de estandarización de reconocida trayectoria en el sector. En los casos en que la literatura académica primaria sobre una herramienta específica resultaba inexistente o insuficiente, se recurrió a fuentes técnicas de referencia debidamente identificadas, para garantizar la trazabilidad y verificabilidad de los planteamientos desarrollados. Tales fuentes seleccionadas fueron analizadas mediante categorización temática de acuerdo con las cinco dimensiones propuestas, considerando para cada herramienta sus funcionalidades, modalidad de licencia, posibilidades de interoperabilidad y aplicación en la gestión de proyectos de construcción.

Con base en lo expuesto, la estructura argumentativa parte de una contextualización del concepto de *software libre* aplicado al entorno de la construcción, continúa con el proceso de digitalización o sistematización de la industria, seguida del desarrollo de cada componente del ecosistema propuesto y finalmente, se mantiene un enfoque crítico que reconoce tanto las oportunidades como las limitaciones inherentes a la adopción de herramientas de código abierto en entornos de la construcción.

Tecnologías libres: Fundamentos y alcance en el contexto de la construcción

El desarrollo contemporáneo de los sistemas productivos está atravesando desafíos que requieren una respuesta innovadora que tribute a la sistematización en todas las etapas del ciclo de vida de un proyecto, donde la adopción de las tecnologías garantice competitividad

en un mundo en constante renovación.

En este escenario, las tecnologías libres emergen como un enfoque alternativo que cuestiona las lógicas tradicionales de acceso, control y uso del conocimiento técnico, proponiendo un modelo sustentado en la apertura, la colaboración y la adaptabilidad. Lejos de constituir únicamente una opción técnica, representan una postura epistemológica y productiva que redefine las relaciones entre usuarios, desarrolladores y medios de producción tecnológica.

A grandes rasgos, el término "software libre" fue formalizado por Stallman (2004) en el marco del Proyecto GNU durante la década de 1980. Con el tiempo, este concepto evolucionó hacia el modelo de código abierto (*open source*), que comparte los principios de apertura del código, aunque con énfasis distintos en lo filosófico.

El software libre según Arriola y Butrón (2008) se define por la posibilidad de que los usuarios tengan:

- Libertad de usar el programa con cualquier propósito (libertad 0).
- Libertad de estudiar cómo funciona el programa y adaptarlo a sus necesidades (libertad 1). El acceso al código fuente es una condición previa para esto.
- Libertad de distribuir copias, con lo que se puede ayudar a otros colegas (libertad 2).
- Libertad de mejorar el programa y publicar las mejoras de modo que toda la comunidad se beneficie (libertad 3). El acceso al código fuente es un requisito previo para esto.

Estas libertades, ampliamente reconocidas en el ámbito académico y técnico, constituyen la base de un modelo de desarrollo colaborativo en el que el conocimiento se concibe como un bien común.

Por su parte, el hardware abierto se refiere a dispositivos cuyos diseños, especificaciones y esquemas son accesibles públicamente, permitiendo su replicación, modificación y mejora por parte de terceros. La OSHWA (Open Source Hardware Association, s. f.), o asociación de hardware de código abierto en su declaración de principios establece que:

> El hardware de código abierto es aquel cuyo diseño se pone a disposición del público para que cualquiera pueda estudiarlo, modificarlo, distribuirlo, fabricarlo y venderlo, o bien, el hardware basado en dicho diseño. El código fuente del hardware, es decir, el diseño a partir del cual está hecho, está disponible en el formato preferido para realizar modificaciones en él (s.p.).

En ese orden de ideas y para los propósitos del presente texto, el software libre y el hardware abierto, se emplearán de manera complementaria bajo la denominación genérica de

tecnologías libres, como un ecosistema socio-técnico compuesto por estándares interoperables que hace posible la modificación, auditoría y redistribución del conocimiento tecnológico aplicado a la construcción. Esta unificación se justifica en la medida en que ambos modelos ofrecen condiciones comparables para el usuario final, pues en la actualidad, estas herramientas se han consolidado como plataformas para la captura y el procesamiento de datos multidimensionales. Esta apertura favorece la innovación distribuida y la adaptación o personalización de soluciones tecnológicas en contextos específicos, ofreciendo una mayor autonomía en el control de la infraestructura tecnológica y agilizando los procesos de ejecución de un proyecto.

A diferencia del ecosistema comercial cerrado, los principios que sustentan las tecnologías libres configuran un marco operativo que contrasta con las restricciones propias de los modelos propietarios. El acceso implica la disponibilidad del código fuente o de los diseños técnicos, lo que facilita a los usuarios comprender el funcionamiento interno de las herramientas. Por su parte, la modificación habilita la adaptación de estas herramientas a necesidades específicas, impulsando procesos de innovación contextualizada.

Asimismo, el principio de distribución beneficia la difusión de versiones originales o modificadas, impulsando el intercambio de conocimiento y la colaboración entre diversos actores. De este modo, los promotores de su uso desarrollan iniciativas orientadas al aprendizaje basado en estas herramientas, articulando enfoques interdisciplinarios del ámbito STEAM (*science*, *technology*, *engineering*, *arts* y *mathematics*) en proyectos colaborativos. Estas experiencias formativas contribuyen al desarrollo de competencias para el uso de hardware y software libre, al tiempo que se apoyan en metodologías de aprendizaje entre pares (P2P) (Niaros et al., 2017).

En contextos productivos, estos principios adquieren implicaciones concretas, la tecnología deja de ser un producto cerrado para convertirse en un proceso dinámico y en constante evolución. En ese sentido, la adopción de tecnologías libres fortalece la autonomía de los procesos, razón por la cual se vincula estrechamente con la noción de soberanía tecnológica, cuyo concepto hace referencia a la capacidad de una comunidad, organización o país para controlar, desarrollar y gestionar sus propias tecnologías, evitando dependencias externas que puedan comprometer independencia.

La relación entre tecnologías libres y soberanía tecnológica se manifiesta en múltiples niveles. En primer lugar, la disponibilidad del conocimiento técnico permite a los actores locales desarrollar soluciones adaptadas a sus contextos, sin necesidad de recurrir a proveedores externos. En segundo lugar, la posibilidad de redistribuir estas soluciones favorece la creación de redes de colaboración que fortalecen las capacidades colectivas. Finalmente, la transparencia inherente a las tecnologías libres contribuye a la generación de confianza en los procesos productivos, al permitir la verificación independiente de los sistemas utilizados.

Sin embargo, esta relación también enfrenta tensiones significativas, particularmente

en entornos donde predominan los modelos propietarios. Las empresas desarrolladoras de software y hardware propietario suelen ofrecer productos altamente especializados, con interfaces optimizadas y soporte técnico estructurado, lo que puede resultar atractivo para organizaciones que buscan eficiencia inmediata. En contraste, las tecnologías libres requieren procesos de adaptación y aprendizaje que pueden percibirse como costosos en términos de tiempo y recursos.

Además, los modelos propietarios se sustentan en esquemas de propiedad intelectual que restringen el acceso al código fuente y limitan las posibilidades de modificación. Estas restricciones generan dependencias que pueden afectar la sostenibilidad de los proyectos a largo plazo, especialmente en contextos donde los recursos económicos son limitados. En este escenario, la elección entre tecnologías libres y propietarias no se reduce a una decisión técnica, sino que implica considerar factores económicos, políticos y culturales. En el ámbito productivo, estas tensiones se manifiestan en decisiones relacionadas con la selección de herramientas, la capacitación del personal y la definición de estrategias tecnológicas.

Asimismo, la dimensión cultural desempeña un papel fundamental en la adopción de tecnologías libres. La transición hacia modelos abiertos implica un cambio en la forma de concebir el conocimiento y la innovación. En lugar de considerar la tecnología como un producto terminado, se le entiende como un proceso colectivo en constante construcción. Este enfoque favorece la participación activa de los usuarios y promueve la generación de comunidades de práctica en torno al desarrollo y uso de herramientas tecnológicas.

Por otra parte, el alcance de las tecnologías libres en los contextos productivos trasciende el factor estrictamente técnico, extendiéndose hacia dimensiones económicas y sociales. La disminución de los costos asociados al licenciamiento puede liberar recursos destinados a la capacitación del talento humano o al fortalecimiento de las infraestructuras tecnológicas. Asimismo, la adopción de tecnologías libres favorece la consolidación de ecosistemas locales de innovación, en los que empresas, universidades y comunidades articulan esfuerzos para el desarrollo colaborativo de soluciones tecnológicas adaptadas a sus necesidades y realidades específicas.

Aun así, es importante reconocer que las tecnologías libres no constituyen una solución universal. Su implementación exige una evaluación rigurosa de las condiciones particulares de cada contexto productivo, considerando aspectos como la disponibilidad de recursos humanos, la infraestructura tecnológica existente y las necesidades operativas de las organizaciones. Desde esta perspectiva, aquello que representa una de sus principales fortalezas puede convertirse, paradójicamente, en una limitación cuando no se dispone de las capacidades técnicas o institucionales necesarias para su adecuada gestión y aprovechamiento.

Por consiguiente, en determinados escenarios, la combinación de herramientas libres y propietarias puede constituir una estrategia más pertinente, siempre que se garantice la coherencia, la interoperabilidad y la sostenibilidad de los procesos tecnológicos involucrados.

Su fundamentación en la apertura, la colaboración y la adaptabilidad las posiciona como una alternativa viable frente a los modelos propietarios, especialmente en contextos donde la autonomía, la optimización de recursos y la perdurabilidad a largo plazo son objetivos prioritarios.

Transformación digital en la gestión de proyectos de construcción

La aplicación de tecnologías libres en la gestión de proyectos de ingeniería civil no constituye un fenómeno reciente. Durante décadas, estuvo sustentada en metodologías tradicionales caracterizadas por el uso intensivo de documentación física, procesos fragmentados y dinámicas de trabajo dependientes de la experiencia individual. Sin embargo, el incremento en la complejidad de las obras, la necesidad de optimizar recursos y las exigencias asociadas a la sostenibilidad y la eficiencia productiva han impulsado la incorporación progresiva de tecnologías digitales en todas las etapas de una obra.

De hecho, con la sistematización de procesos y medios de producción, surge aproximadamente en el año 2011, la cuarta revolución industrial o también llamada Industria 4.0. Al respecto, explican Cuevas et al. (2021) que por medio de sistemas ciberfísicos se mejora el desarrollo tecnológico e industrial, dando lugar a una "fábrica inteligente" paradigma que integra automatización, conectividad, análisis de datos y sistemas inteligentes con el propósito de optimizar la productividad y la toma de decisiones en distintos sectores productivos.

En el área de la ingeniería civil, la implementación de tecnologías adquiere una relevancia particular en todo el ciclo de vida de la obra, pues la transformación digital redefine los procesos asociados a la gestión de proyectos de construcción, configurando nuevas dinámicas de planificación, ejecución, supervisión y control sustentadas en el uso intensivo de tecnologías digitales. Por ello, la comunidad de desarrolladores ha producido soluciones que progresivamente han ganado madurez técnica y adopción institucional, como el surgimiento de herramientas como FreeCAD para diseño asistido por computadora, o QGIS para análisis geoespacial. Sin embargo, la fragmentación del ecosistema, la curva de aprendizaje asociada y la ausencia de soporte comercial formal han constituido obstáculos persistentes para su incorporación sistemática en los flujos de trabajo de la industria constructiva.

Desde esta perspectiva, la digitalización en la construcción no se limita únicamente a la sustitución de herramientas analógicas por plataformas informáticas, sino que implica una transformación estructural de los procesos de gestión, comunicación y producción técnica. La convergencia entre modelado digital, sistemas de información geográfica, monitoreo remoto, análisis de datos y automatización ha ampliado las posibilidades para la supervisión y evaluación continua de los proyectos, fortaleciendo la capacidad de respuesta ante variaciones técnicas, operativas y ambientales. Además, las tecnologías disruptivas como el *big data*, la robótica colaborativa, el IoT, la IA, los sistemas ciber-físicos o la fabricación aditiva, redefinirán los procesos operativos de la industria, creando nuevas oportunidades para maximizar la eficiencia, agilidad y flexibilidad en la fabricación, y añadiendo capas

de información digital que mejorarán el funcionamiento de las máquinas (Brettel et al., 2014).

En este contexto, el ciclo de vida del proyecto de construcción adquiere una dimensión tecnológica transversal. Durante la fase de diseño y planificación, herramientas de modelado y representación digital facilitan la elaboración de propuestas más precisas y coordinadas. Posteriormente, en las etapas de ejecución y seguimiento, tecnologías asociadas al monitoreo remoto y la captura de datos permiten optimizar procesos de inspección, control y evaluación del avance físico de las obras. Sin embargo, la integración de herramientas digitales ha favorecido entornos de trabajo más integrados, donde la información puede ser generada, compartida y actualizada en tiempo real entre múltiples actores.

Aunado a ello, la incorporación de drones, sensores y plataformas de simulación impulsa nuevas formas de recopilación y análisis de información técnica. Estas herramientas han incrementado la capacidad de observación sobre el comportamiento de estructuras, terrenos y procesos constructivos, contribuyendo a una gestión más dinámica y basada en datos. De igual manera, los entornos de monitoreo remoto y simulación digital han comenzado a ocupar un lugar relevante tanto en la formación académica como en la evaluación de escenarios constructivos complejos.

Aun así, este proceso de digitalización avanzada también evidencia importantes desafíos. En muchos casos, la adopción de soluciones digitales se encuentra condicionada por modelos cerrados que restringen la modificación, adaptación y distribución de las herramientas utilizadas, generando escenarios de dependencia tecnológica que impactan en el campo productivo.

En consecuencia, la discusión sobre transformación digital en la gestión de obra trasciende el plano estrictamente técnico y se vincula con aspectos asociados al acceso, al conocimiento, la sostenibilidad tecnológica y la capacidad de apropiación de herramientas digitales; se trata de una reconfiguración sistémica de cómo se crea, gestiona y transfiere el valor técnico. Bajo este panorama, las tecnologías libres adquieren relevancia como alternativa para ampliar las posibilidades de integración tecnológica en la construcción, favoreciendo esquemas más abiertos, flexibles, adaptables a las necesidades de distintos contextos sociales y productivos, que conectan el mundo físico con modelos virtuales, dando la posibilidad de tomar decisiones basadas en evidencia y en criterios técnicos.

Con esta premisa, estas plataformas de código abierto han sentado las bases para que numerosos innovadores desarrollen prototipos y materialicen ideas susceptibles de mejora continua, sin la necesidad de contar con grandes instalaciones industriales ni de asumir procesos de producción masiva. Como resultado, este tipo de espacios ha experimentado un notable crecimiento en los últimos años. En ellos es posible encontrar impresoras 3D, escáneres tridimensionales, kits de soldadura, cortadoras láser y una amplia variedad de herramientas que facilitan la fabricación de diversos objetos (Tabarés, 2019).

Desde el punto de vista epistemológico, la gestión de proyectos de construcción con

tecnologías libres implica un cambio de paradigma que trasciende la simple sustitución de herramientas. Supone la adopción de una filosofía de trabajo colaborativo, orientada a la generación de conocimiento compartido, la interoperabilidad mediante estándares abiertos —como el formato IFC en el caso del modelado BIM— y la adaptabilidad de los sistemas a los requerimientos específicos de cada organización. Este enfoque resulta particularmente relevante en el contexto latinoamericano, donde las limitaciones presupuestarias y la necesidad de soluciones adaptadas a realidades locales hacen de las tecnologías libres una opción estratégicamente pertinente.

En este contexto, el enfoque desarrollado busca trascender la visión fragmentada que tradicionalmente ha caracterizado la incorporación de tecnologías digitales en la administración de proyectos de construcción. Más que considerar las herramientas tecnológicas como soluciones aisladas o independientes, se propone comprenderlas como componentes interrelacionados de un ecosistema integrado, en el que cada una desempeña una función específica y complementaria dentro de las distintas fases del proyecto. Esta perspectiva favorece una gestión más articulada de la información, optimiza los procesos de toma de decisiones y fortalece la coordinación entre los diversos actores involucrados en la planificación, diseño, ejecución, operación y mantenimiento de las obras.

Tecnologías libres en el ciclo de vida del proyecto de construcción

Los planteamientos expuestos hasta ahora muestran que el potencial de las tecnologías libres trasciende su condición de herramientas tecnológicas aisladas, adquiriendo relevancia como elementos articuladores de procesos, conocimientos y capacidades dentro de los entornos productivos. En el campo de la construcción, caracterizado por la participación de múltiples actores y por la necesidad de coordinar información técnica a lo largo de diversas etapas, estas tecnologías ofrecen posibilidades significativas para fortalecer la eficiencia operativa, optimizar el uso de recursos y favorecer una mayor autonomía en la gestión de los proyectos.

En este ámbito, la disponibilidad de herramientas cuya arquitectura puede ser estudiada, adaptada y mejorada contribuye a reducir dependencias tecnológicas y amplía las capacidades de respuesta ante los desafíos particulares de cada proyecto. Asimismo, la posibilidad de compartir modelos, bibliotecas de objetos, *scripts*, procedimientos y soluciones técnicas promueve dinámicas colaborativas entre profesionales de distintas disciplinas, favoreciendo la construcción colectiva de conocimiento y la mejora continua de los procesos constructivos. A ello se suma la transparencia inherente a los entornos abiertos, la cual facilita la trazabilidad de la información y fortalece los mecanismos de control, seguimiento y evaluación de las decisiones adoptadas durante el desarrollo de una obra.

No obstante, el verdadero alcance de las tecnologías libres puede apreciarse con mayor claridad cuando se analizan desde una perspectiva integral del proyecto de construcción. Cada fase, desde la concepción inicial y la planificación hasta la ejecución y el control de la infraestructura, presenta necesidades específicas de gestión de información, coordinación

técnica y soporte tecnológico. En consecuencia, resulta pertinente examinar de qué manera estas tecnologías pueden incorporarse a lo largo del ciclo de vida del proyecto, identificando herramientas, aplicaciones y contribuciones específicas en cada fase. Desde este ángulo, el presente apartado aborda las principales tecnologías libres empleadas en la gestión de proyectos de construcción, con el propósito de comprender su aporte a la transformación de los procesos constructivos.

En este sentido, el ecosistema de tecnologías libres en la construcción puede comprenderse como una arquitectura de información distribuida, sustentada en principios de interoperabilidad abierta. Esta arquitectura se apoya en estándares como IFC, interfaces de programación de aplicaciones (APIs), bases de datos espaciales y sistemas de control de versiones, configurando un entorno digital que hace posible la integración continua de datos a lo largo del ciclo de vida del proyecto y la articulación coherente de las fases de diseño, análisis, planificación, ejecución y control, se muestran a continuación:

Diseño y modelado

La fase de diseño constituye el punto de partida del proyecto y representa el momento en que las decisiones tomadas tienen el mayor impacto sobre los costos y la calidad del resultado final. En este caso, las herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) de código abierto han alcanzado un nivel de madurez que las hace técnicamente comparables con sus contrapartes propietarias para un amplio espectro de aplicaciones en ingeniería civil y arquitectura.

FreeCAD es la plataforma CAD libre utilizada en aplicaciones de ingeniería civil y arquitectura, siendo una aplicación paramétrica 3D de propósito general con la que se pueden hacer modelados de sólidos, superficies y conjuntos mecánicos. Este recurso está disponible para descarga en compatibilidad a los sistemas operativos Mac, Windows y Linux (The FreeCAD Team, 2019), donde se encuentran de manera explícita las instrucciones para su instalación.

Su arquitectura modular basada en OpenCASCADE Technology le confiere capacidades de modelado sólido comparables a las de plataformas propietarias de referencia, estos módulos son llamados *workbenches* y amplían de manera casi ilimitada sus posibilidades. Una lista amplia de *workbenches* y su descripción se puede encontrar en los recursos que comparte la organización FreeCAD (The FreeCAD Team, 2022). Para tareas de documentación técnica en 2D, LibreCAD proporciona un entorno de dibujo técnico que soporta el formato DXF como estándar de intercambio, garantizando la interoperabilidad con sistemas propietarios ampliamente utilizados en la industria.

En el área del Modelado de Información de la Construcción, *Building Information Modeling* (BIM), la herramienta Bonsai (anteriormente BlenderBIM), desarrollada como complemento del *software* de modelado 3D Blender, ha emergido como la alternativa libre más robusta para la generación y gestión de modelos BIM nativamente compatibles con el estándar de interoperabilidad *Industry Foundation Classes* (IFC). Esta herramienta

contribuye a crear modelos digitales que incorporan información geométrica, paramétrica y semántica de los componentes constructivos, durante todo el periodo de ejecución de un proyecto, facilitando la coordinación multidisciplinaria que caracteriza a los enfoques BIM (Volk et al., 2014). El estándar internacional libre IFC, desarrollado por buildingSMART International, constituye el eje de interoperabilidad para el intercambio de modelos entre plataformas heterogéneas sin pérdida de información, de modo que su adopción en entornos de tecnologías libres favorece la interoperabilidad entre aplicaciones que implementan el estándar.

La visualización de modelos tridimensionales es un componente esencial de la comunicación técnica en proyectos de construcción. Blender, en su calidad de *suite* de modelado y renderizado 3D de código abierto, tiene capacidades de visualización arquitectónica de alto nivel mediante su motor de render Cycles, que implementa algoritmos de trazado de rayos comparables con los de las soluciones comerciales más avanzadas. Para la revisión colaborativa de modelos BIM, herramientas como xBIM Toolkit permiten la visualización y auditoría de archivos IFC sin requerir licencias adicionales, facilitando la participación de múltiples actores en el proceso de revisión y aprobación de proyectos.

Estas herramientas promueven la colaboración interdisciplinaria entre especialistas a través de formatos como IFC, aprovechando que los modelos pueden intercambiar información mediante un estándar común, aunque el grado de interoperabilidad depende de las implementaciones y funcionalidades de las aplicaciones involucradas. Explica Azhar (2011), que su aplicación impulsa la detección temprana de interferencias geométricas antes de la fase de ejecución. Este flujo de trabajo integrado mitiga el riesgo de re-trabajos, reduciendo los errores de diseño, disminuyendo los costos operativos y, en consecuencia, acortando los plazos de entrega del proyecto, demostrando que la soberanía tecnológica es sinónimo de productividad técnica y financiera.

Análisis y simulación

Esta fase comprende el conjunto de procesos mediante los cuales se verifica el comportamiento previsto de la estructura, se evalúan las condiciones del sitio y se desarrollan modelos predictivos que orientan la toma de decisiones técnicas. La disponibilidad de herramientas libres amplía las alternativas para estas tareas del ecosistema de código abierto aplicado a la construcción.

En el campo de la simulación estructural, OpenSees (*Open System for Earthquake Engineering Simulation*) es un potente *software* de análisis por elementos finitos de código abierto utilizado para la evaluación sísmica de estructuras (Mazzoni et al., 2006), fue desarrollado originalmente en el Centro de Investigación de Ingeniería Sísmica del Pacífico (PEER) de la Universidad de California, Berkeley, en 1998 (McKenna, 2011), con el objetivo de establecer un enfoque formalizado de ingeniería sísmica basado en el desempeño, proporcionando datos, modelos y herramientas de *software* valiosos, ha sido ampliamente adoptada en la comunidad académica e investigadora para el análisis no lineal de estructuras sometidas a cargas sísmicas.

La decisión de desarrollarlo como *software* de código abierto surgió del deseo de fomentar la colaboración, involucrar a la comunidad, permitir la personalización y la adaptabilidad, y facilitar oportunidades educativas y de capacitación (Mazzoni et al., 2006). Se implementó utilizando una combinación de lenguajes de programación, incluidos C, C++ y Fortran (McKenna, 2011). Su capacidad para modelar comportamientos materiales complejos y su extensibilidad mediante módulos personalizados lo convierten en una herramienta de referencia para investigación avanzada en ingeniería estructural.

Por otro lado, para análisis de elementos finitos de propósito general, Code_Aster, desarrollado por el organismo francés EDF (*Électricité de France*), ofrece capacidades de cálculo estructural, térmico y de mecánica de fluidos con un nivel de rigor técnico que lo hace adecuado para proyectos de infraestructura de gran envergadura. Otra alternativa es Salome-Meca.

En el caso del análisis geoespacial que involucra caracterización del sitio, planificación de infraestructura vial, gestión de redes de servicios o evaluación de riesgos naturales QGIS (anteriormente denominado Quantum GIS) es el Sistema de Información Geográfica (SIG) libre de referencia, con una comunidad de desarrollo activa que ha producido una plataforma con funcionalidades comparables a las de ArcGIS en numerosas categorías de análisis. Pertenece a la *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo) y entre sus principales fortalezas se encuentran la incorporación de herramientas mediante complementos y una comunidad de usuarios y desarrolladores en constante crecimiento (Rosas-Chavoya et al., 2022). Su compatibilidad con una amplia gama de formatos vectoriales y *raster*, así como su integración con bases de datos espaciales como PostGIS, le dan una versatilidad operativa que lo hace adecuado para la mayoría de los requerimientos geoespaciales en proyectos de construcción.

En general, el desarrollo de modelos predictivos para la anticipación de comportamientos del proyecto, incluyendo predicción de plazos, identificación de riesgos y optimización de recursos, encuentra en las plataformas de ciencia de datos de código abierto un soporte metodológico sólido. Por ejemplo, Python, con su ecosistema de bibliotecas científicas (NumPy, Pandas, Scikit-learn), simplifica la implementación de modelos estadísticos y de aprendizaje automático aplicados a series temporales de avance de obra, datos de costos y registros de incidentes, generando información analítica de valor para la gestión proactiva del proyecto. Por su parte R, brinda capacidades avanzadas para el análisis estadístico y la visualización de datos que complementan los pronósticos en contextos de investigación aplicada.

Planificación y gestión de obras

La planificación de proyectos de construcción requiere herramientas que agilicen la estructuración del trabajo, así como la integración de información de costos, recursos humanos y materiales en un modelo coherente de gestión. El ecosistema de *software* libre ofrece alternativas competentes para cada una de estas necesidades.

Entre ellas, ProjectLibre constituye una de las alternativas de código abierto para la gestión de proyectos más utilizada a nivel mundial como alternativa a Microsoft Project. Abramova et al. (2016) indica que ProjectLibre proporciona una visión amplia de WBS y RBS durante las etapas del proyecto, se instala fácilmente en un sistema local utilizando MSI, el motor utilizado para instalar el *software* en Windows. Eso significa que un proyecto está representado por un archivo que se almacena en un sistema de disco y se puede guardar y cargar posteriormente, característica que lo diferencia de la mayoría de las herramientas de gestión de proyectos que intentan proporcionar un entorno de colaboración en línea al que se accede y utiliza desde cualquier lugar.

Para ello, su formato de archivo es compatible con el estándar MPX, brindando interoperabilidad con otras plataformas de gestión de proyectos. Además, cuenta con la definición de estructuras de desglose del trabajo (EDT/WBS), la asignación de recursos, la generación de diagramas de Gantt y el cálculo automático de la ruta crítica. ProjectLibre fue concebido como sustituto completo para Microsoft Project con la capacidad de abrir archivos nativos de este último, se ejecuta en la plataforma Java lo que le da la versatilidad de correr en diferentes sistemas operativos (Pérez y Vargas, 2018).

Para equipos distribuidos que requieren capacidades de colaboración en tiempo real, GanttProject es una alternativa fácil de utilizar ya que tiene una interfaz liviana con funcionalidades básicas para la gestión de proyectos que resultan adecuadas para la creación de diagramas Gantt, facilitando una visualización clara del desarrollo del proyecto y seguimiento de este.

Definidas las tareas, los eventos y su relación temporal, en la parte derecha de la pantalla se genera el calendario de planificación del proyecto, incorporando fechas y recursos. Asimismo, el sistema produce automáticamente diagramas PERT y un esquema de asignación de recursos humanos asociados a cada actividad (GanttProject, 2003). De igual forma, se pueden realizar informes en formatos PDF y HTML, destacando como una de sus principales ventajas la compatibilidad para el intercambio de archivos con Microsoft Project (MS Project). Este proyecto fue iniciado en 2003 por Alexandre Thomas y otros desarrolladores (GanttProject, 2003).

En el control integrado de costos y cronogramas, la metodología del Valor Ganado (*Earned Value Management*) encuentra implementación en diversas herramientas libres. La integración de datos de programación con hojas de cálculo desarrolladas en LibreOffice Calc permite implementar indicadores de desempeño como el Índice de Desempeño del Cronograma (SPI) y el Índice de Desempeño del Costo (CPI), proporcionando información cuantitativa sobre el estado del proyecto respecto a las líneas base establecidas.

Para la gestión de la información documental del proyecto, plataformas como OpenProject ofrecen un entorno web colaborativo que integra gestión de tareas, control de versiones de documentos y seguimiento de incidencias en una solución unificada bajo licencia

GPL. Abramova et al. (2016) explican que a través de este *software* se pueden definir tareas de proyectos asociadas a una lista de pedidos y asignar los recursos (materiales, equipos y mano de obra) que se utilizan en cada tarea y sus costos. También, se pueden generar los diagramas de Gantt y los diagramas PERT para la gestión de las tareas del proyecto, así como la administración de recursos financieros y el seguimiento de costos, por lo tanto, se puede hacer seguimiento y control de la obra.

Ejecución y seguimiento

La fase de ejecución representa el momento de mayor complejidad operativa en el ciclo de vida del proyecto, ya que involucra la coordinación simultánea de múltiples frentes de trabajo, la gestión de proveedores y subcontratistas, el control de calidad de los materiales y procesos, y el seguimiento continuo del avance de las actividades programadas. Las tecnologías libres aplicadas a esta fase se articulan en torno a tres categorías principales: sistemas aéreos no tripulados (drones), sensores de Internet de las Cosas (IoT) y plataformas de monitoreo en tiempo real.

Los drones de código abierto, en particular los desarrollados sobre la plataforma ArduPilot (anteriormente APM), representan una alternativa viable para la captura periódica de imágenes aéreas del sitio de obra con fines de seguimiento del avance, inspección de zonas de difícil acceso y generación de modelos topográficos actualizados. ArduPilot es un *firmware* de código abierto creado en 2009, que nace como un sistema de piloto automático que soporta la creación y control de múltiples configuraciones de aeronaves y vehículos terrestres, tales como drones, submarinos y botes, con capacidades de planificación de misiones autónomas que permite reproducir rutas de viajes sistemáticas para la cobertura completa del área de obra. Al ser de código abierto, brinda seguridad al momento de programar un vehículo e integrar los diferentes sensores y su comunicación en tiempo real, ya que cuenta con una rápida retroalimentación de parte de su comunidad de usuarios (ArduPilot Dev Team, 2020).

El procesamiento fotogramétrico de las imágenes capturadas mediante herramientas como OpenDroneMap genera nubes de puntos, modelos digitales del terreno y ortofotografías georreferenciadas que pueden integrarse directamente con las plataformas de análisis geoespacial descritas anteriormente.

La incorporación de sensores IoT de bajo costo en el sitio de obra contribuye al monitoreo permanente de variables físicas críticas, tales como la temperatura y la humedad ambiental, la resistencia del concreto *in situ*, las deformaciones estructurales y las variaciones de los niveles freáticos en excavaciones. En ese contexto, plataformas como Arduino (hardware abierto certificado) y Raspberry Pi (hardware de bajo costo con componentes parcialmente documentados) proporcionan la base computacional para desarrollar sistemas de adquisición de datos personalizados y ajustados a las condiciones específicas de cada obra. Asimismo, la integración de estos dispositivos con plataformas de gestión de datos ya sea en la nube o en servidores locales, facilita la transmisión y el procesamiento de la información a través protocolos de comunicación estándar, como MQTT.

Para la visualización y gestión de los datos generados por sensores IoT, Grafana, distribuida actualmente bajo licencia AGPL v3, se ha consolidado como una de las herramientas más avanzadas y versátiles dentro del ecosistema de *software* libre. La plataforma ofrece funcionalidades para la creación de tableros de control con actualización en tiempo real y amplias posibilidades de personalización, lo que favorece el monitoreo de sistemas, el análisis de indicadores de desempeño y la supervisión continua de información proveniente de diversas fuentes. Su arquitectura flexible y extensible facilita la integración con múltiples sistemas de almacenamiento de datos, incluyendo bases de datos relacionales y de series temporales, como PostgreSQL e InfluxDB. Asimismo, incorpora mecanismos de filtrado y exploración que enriquecen la interpretación de grandes volúmenes de información, convirtiéndola en una alternativa especialmente útil para el análisis y seguimiento de datos complejos en entornos productivos (Grafana Labs, s. f.).

La combinación de estos componentes, sensores de hardware abierto, protocolos de comunicación estándar y plataformas de visualización libre, constituye una alternativa para el seguimiento de obra basada en componentes abiertos y de amplia disponibilidad que puede implementarse con una inversión significativamente inferior a la requerida por soluciones propietarias equivalentes.

Evaluación y control

La fase de evaluación y control del proyecto comprende el conjunto de procesos destinados a verificar el cumplimiento de los objetivos establecidos, identificar desviaciones respecto a las líneas base de alcance, costo y tiempo, y generar información que respalde la toma de decisiones correctivas. En el marco de las tecnologías libres, esta etapa se sustenta en capacidades avanzadas de análisis de datos, visualización de información y auditoría tecnológica.

El procesamiento de los datos generados durante el desarrollo del proyecto, incluyendo registros de avance, resultados de control de calidad, reportes de incidentes e indicadores de desempeño, constituye la base para el seguimiento y la evaluación de los procesos constructivos. Las plataformas Python y R, previamente mencionadas en relación con la simulación predictiva, también ofrecen amplias posibilidades para el análisis retrospectivo y en tiempo real de métricas asociadas al proyecto. Asimismo, la implementación de flujos automatizados de procesamiento de datos, entendidos como secuencias de tareas interconectadas para la extracción, transformación, análisis y visualización de información, facilita la generación periódica de reportes con una intervención manual mínima, permitiendo que los equipos de gestión concentren sus esfuerzos en actividades estratégicas de mayor valor agregado.

La visualización de datos de proyecto constituye un componente crítico de la comunicación con los actores involucrados. Apache Superset (Apache Software Foundation, s. f.), es una herramienta de análisis y visualización de datos de código abierto que crea tableros interactivos y personaliza visualizaciones a partir de diversas fuentes de datos. Su capacidad para conectarse con bases de datos relacionales, archivos CSV y APIs REST

la convierte en una alternativa versátil para la presentación de información de proyecto a distintos niveles de la organización. La auditoría tecnológica en el contexto de las tecnologías libres adquiere una dimensión particular al incluir la verificación del desempeño funcional de las herramientas, la evaluación de la integridad del código fuente, la trazabilidad de las modificaciones realizadas y el cumplimiento de las licencias de uso.

Por otro lado, Git, considerado el sistema de control de versiones distribuido de referencia a nivel mundial, proporciona la infraestructura necesaria para administrar las distintas versiones de los archivos digitales asociados al proyecto, incluyendo modelos, *scripts* de análisis y documentación técnica (Blischak et al., 2016; Ram, 2013). Su utilización garantiza la trazabilidad de las modificaciones realizadas a lo largo del tiempo, permitiendo identificar qué cambios se efectuaron, quién los realizó y cuáles fueron sus motivaciones. Asimismo, facilita el trabajo colaborativo entre múltiples participantes, favorece el desarrollo simultáneo de tareas y da la posibilidad de recuperar versiones anteriores cuando sea necesario corregir errores o revertir decisiones adoptadas durante la ejecución del proyecto.

Una de las innovaciones más relevantes dentro de este ecosistema es la capacidad de acceder de forma remota a la información generada en obra, cuya importancia se ha visto reforzada por los procesos de digitalización acelerada que han caracterizado al sector construcción en los últimos años. La adopción de arquitecturas de datos basadas en herramientas libres, que integran servidores de bases de datos como PostgreSQL, sistemas de gestión documental como Nextcloud y plataformas de orquestación de flujos de información como Apache Airflow, propicia la consolidación de repositorios centralizados accesibles en tiempo real desde cualquier ubicación con conexión a internet.

Esta capacidad modifica sustancialmente los procesos de supervisión y toma de decisiones, al facilitar la participación informada de actores geográficamente distribuidos, entre ellos propietarios, supervisores y consultores externos, en las actividades de seguimiento y control del proyecto. En conjunto, esta integración tecnológica constituye uno de los principales elementos diferenciadores del ecosistema de tecnologías libres frente a la adopción aislada de herramientas independientes, al promover una gestión más articulada, transparente y eficiente de la información.

Potencialidades y limitaciones para la integración de tecnologías libres en proyectos de construcción

El análisis del ecosistema de tecnologías libres para la gestión de proyectos de construcción revela un panorama de oportunidades significativas acompañadas de limitaciones que tienen que ser reconocidas con rigor académico. Destaca Acosta (2024) que su implementación presenta una oportunidad transformadora que viene acompañada de desafíos cruciales, pues las empresas deben estar dispuestas a asumir los costos que faciliten la transición efectiva hacia la digitalidad.

Entre las oportunidades, destaca en primer lugar la reducción del costo total de

propiedad tecnológica, que includes además de la eliminación del costo de licenciamiento, la mayor libertad para adaptar las herramientas a los procesos específicos de cada organización sin depender de ciclos de actualización controlados por proveedores externos. Mediante el uso de *software* libre se ahorra en licencias y se facilita el acceso a herramientas avanzadas para la industria (Del Nagy et al., 2010).

Otro beneficio relevante es la apertura del código y diseños, característica que permite el co-desarrollo entre empresas, universidades y comunidades, acelerando soluciones compartidas (Duparc et al., 2025), que pueden adaptarse a materiales, capacidades productivas y contextos locales.

Además, la interoperabilidad basada en estándares abiertos, particularmente el formato IFC en el ámbito BIM y los protocolos OGC en el campo geoespacial, representa una ventaja estructural del ecosistema de tecnologías libres frente a los entornos propietarios, los cuales suelen recurrir a formatos cerrados como mecanismo de dependencia tecnológica. La adopción de estándares abiertos facilita la unificación entre sistemas heterogéneos, reduce los costos asociados a la migración tecnológica y favorece la preservación de los activos digitales del proyecto a largo plazo, independientemente de la continuidad de los proveedores de *software*. En esta línea, Regona et al. (2022) señalan que la integración de tecnologías abiertas con BIM, IoT, IA y plataformas digitales puede mejorar la productividad, la planificación y la sostenibilidad en las obras de construcción.

Entre las limitaciones más relevantes a considerar, Tayal et al. (2024) señalan los costos iniciales de implementación, ya que, aunque el código fuente sea gratuito, la adopción efectiva de estas tecnologías exige inversiones significativas en infraestructura, capacitación e integración de sistemas para su aprovechamiento integral. A ello se suma la curva de aprendizaje asociada, la cual en muchos casos resulta más pronunciada debido a que estas herramientas no siempre cuentan con los niveles de usabilidad e interfaces intuitivas propias de las soluciones propietarias consolidadas.

Igualmente, destaca la fragmentación del soporte técnico, que depende de comunidades de usuarios y documentación distribuida en lugar de contratos de soporte formal. A diferencia de los sistemas propietarios, que generalmente ofrecen soluciones integradas y soporte técnico centralizado, las tecnologías libres exigen un mayor grado de participación por parte de los usuarios y la heterogeneidad de los niveles de madurez de las distintas herramientas del ecosistema, que puede generar inconsistencias en la calidad del flujo de trabajo integrado. Esto implica la necesidad de formación especializada y el desarrollo de competencias en programación, diseño y gestión tecnológica.

También se presentan preocupaciones por licencias, responsabilidad, ciberseguridad y retorno económico, ya que muchas empresas priorizan soluciones propietarias percibidas como “más seguras” ante riesgos legales y de seguridad (Demirkesen, 2022), al respecto, la evidencia empírica muestra que el *software* de código abierto con comunidades activas tiende a corregir vulnerabilidades más rápido que el *software* propietario. También, se perciben

barreras significativas por resistencia al cambio en la cultura organizacional por lo que es esencial promover una cultura de innovación y aceptación a través de una comunicación clara y un liderazgo enfocado en la innovación (Acosta, 2024).

Hasta ahora la evidencia sugiere que el *software* libre constituye una alternativa técnica y operativamente competitiva frente a las soluciones propietarias para la gestión de proyectos de construcción. Sus principales fortalezas radican en la apertura del código, la interoperabilidad basada en estándares abiertos, la flexibilidad para adaptarse a requerimientos específicos y la reducción de la dependencia tecnológica. Por su parte, las plataformas propietarias mantienen ventajas relacionadas con la madurez de sus interfaces, la integración nativa entre productos de un mismo fabricante y la disponibilidad de soporte comercial centralizado. En consecuencia, la elección entre ambos enfoques debe fundamentarse en los objetivos estratégicos de la organización, el nivel de capacidades técnicas disponibles y las condiciones particulares del entorno de implementación.

A continuación, la tabla 1 presenta una comparación técnica y objetiva de las fortalezas y limitaciones de cada enfoque en la gestión de proyectos de construcción, sin establecer una superioridad absoluta de un modelo sobre otro.

Tabla 1: Comparación de características técnicas y operativas del software libre y propietario en la construcción.

Criterio de evaluación	**Software con licencias libres o de código abierto**	**Software propietario (estándar comercial)**
Costo de licenciamiento	Generalmente sin costos de licencia; reduce el costo total de propiedad.	Requiere adquisición de licencias, suscripciones o pagos periódicos.
Acceso al código fuente	Acceso completo para inspección, modificación y auditoría.	Código cerrado, sin posibilidad de modificación por el usuario.
Personalización	Alto nivel de adaptación a necesidades específicas mediante desarrollo propio o comunitario.	Personalización limitada a las funcionalidades previstas por el fabricante.
Independencia tecnológica	Reduce la dependencia de un proveedor único y favorece la soberanía tecnológica.	Alto grado de dependencia del fabricante y de sus políticas comerciales.
Interoperabilidad	Amplio soporte para estándares abiertos (IFC, OGC, CSV, JSON, XML, entre otros).	Puede incorporar estándares abiertos, aunque con frecuencia utiliza formatos propietarios.
Transparencia	Los algoritmos y procesos pueden ser auditados y verificados.	Funcionamiento interno no accesible para los usuarios.
Escalabilidad	Puede ampliarse mediante módulos, extensiones o desarrollos específicos.	Depende de las funcionalidades y actualizaciones ofrecidas por el proveedor.
Innovación	Impulsada por comunidades de desarrollo, instituciones académicas y empresas colaboradoras.	Determinada por la hoja de ruta y prioridades comerciales del fabricante.

Continúa en la siguiente página...

Tabla 1 – Continuación de la página anterior

Criterio de evaluación	Software con licencias libres o de código abierto	Software propietario (estándar comercial)
Soporte técnico	Disponible mediante comunidades, empresas especializadas o equipos internos.	Generalmente centralizado y respaldado por contratos de soporte oficial.
Seguridad	Auditoría abierta del código y rápida identificación de vulnerabilidades por la comunidad.	Depende de las revisiones y actualizaciones realizadas exclusivamente por el fabricante.
Actualizaciones	Frecuencia variable según la comunidad o proyecto; pueden adaptarse localmente.	Programadas y controladas por el proveedor del *software*.
Curva de aprendizaje	Puede ser mayor en algunas herramientas debido a interfaces menos estandarizadas.	Suele ofrecer interfaces más refinadas y amplia documentación comercial.
Integración con otras herramientas	Favorecida por estándares abiertos y APIs ampliamente documentadas.	Alta integración dentro del ecosistema del fabricante; puede presentar restricciones con plataformas externas.
Sostenibilidad a largo plazo	La continuidad no depende exclusivamente de una empresa y puede mantenerse mediante la comunidad o instituciones.	Condicionada a las decisiones comerciales del proveedor (cambios de licencia, discontinuidad o fin del soporte).
Adecuación para investigación y educación	Muy favorable por su accesibilidad, reproducibilidad y posibilidad de experimentación.	Limitada por restricciones de licenciamiento y acceso al código fuente.
Aplicabilidad en la gestión de proyectos de construcción	Cubre de forma integral procesos de modelado, análisis, planificación, monitoreo y control mediante un ecosistema interoperable.	Ofrece soluciones consolidadas y altamente integradas, aunque con mayores costos y dependencia tecnológica.

Fuente: Elaboración propia con apoyo de **ChatGPT**, a partir de fuentes bibliográficas y documentales consultadas por la autora y de instrucciones específicas para la organización y comparación de la información. Los contenidos generados con asistencia de inteligencia artificial fueron revisados, contrastados, verificados y editados por la autora, quien asume la responsabilidad por la selección, interpretación y versión final de los contenidos presentados.

Tal como se ha descrito, las tecnologías libres poseen un alto potencial para su implementación, no obstante, su integración en la práctica enfrenta diversas barreras relacionadas con la calidad de las soluciones disponibles, las capacidades técnicas requeridas, las limitaciones de inversión, la cultura organizacional, la fragmentación del sector y los marcos normativos vigentes. En consecuencia, para lograr su consolidación en la industria de la construcción, resulta imprescindible gestionar adecuadamente estas limitaciones, lo cual implica además de estrategias de carácter empresarial, la inversión sostenida en la capacitación del personal, el establecimiento de protocolos internos de soporte y la evaluación sistemática del grado de madurez de cada herramienta antes de su incorporación a los flujos de trabajo productivos.

Reflexiones finales

El análisis desarrollado permite plantear que las tecnologías libres constituyen, en su conjunto, un entorno técnica y operativamente viable para la gestión integral de proyectos de construcción,

al disponer de alternativas con capacidades funcionales comparables a las soluciones propietarias en múltiples ámbitos de aplicación, sumando beneficios asociados a la apertura del código, la adaptabilidad y la reducción de la dependencia tecnológica.

El modelo propuesto organiza la oferta de tecnologías libres en cinco dimensiones interconectadas que cubren desde la conceptualización del diseño hasta el control final del proyecto. La coherencia sistémica de esta estructura, sustentada en estándares abiertos de interoperabilidad y en plataformas de integración de datos, constituye su principal fortaleza frente a la transición aislada de herramientas individuales.

Desde una perspectiva organizacional y sectorial, su adopción impacta en la autonomía tecnológica de las instituciones, en la reducción de brechas de acceso a herramientas avanzadas y en la mejora de las condiciones de reproducibilidad y transferencia del conocimiento técnico en los ámbitos académico y profesional.

No obstante, es preciso reconocer que su implementación efectiva depende de factores complementarios a la disponibilidad tecnológica, entre ellos la madurez digital de las organizaciones, la capacitación del talento humano y la capacidad institucional para integrar y sostener flujos de trabajo basados en herramientas interoperables. Estos elementos condicionan el grado de éxito en la adopción del ecosistema propuesto dentro de los entornos productivos de la construcción.

A la luz de los elementos analizados, se evidencia que la tecnología libre para la gestión de proyectos de construcción se configura como una alternativa estratégica para la transformación digital del sector en la medida en que promueve modelos de gestión más abiertos, sostenibles y adaptados a diversos contextos. Su consolidación constituye un campo relevante para la investigación aplicada y la innovación tecnológica en ingeniería civil, particularmente en escenarios donde la eficiencia, la autonomía operativa y la sostenibilidad de los sistemas tecnológicos son factores críticos de decisión.

Referencias

Abramova, V., Pires, F., y Bernardino, J. (2016). Open Source and Proprietary Project Management Tools for SMEs. *Journal of Information Systems Engineering & Management*, *1*(3), 177-186. https://doi.org/10.20897/lectito.201633

Acosta, M. (2024). La Industria 4.0: Transformando el futuro de la Construcción. En *Robótica: promesas, utopía o futuro distópico* (pp. 2-22, Vol. 1). Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL).

Apache Software Foundation. (s. f.). Apache Superset documentation.

ArduPilot Dev Team. (2020). ArduPilot Documentation — ArduPilot documentation.

Arriola, O., y Butrón, K. (2008). Sistemas integrales para la automatización de bibliotecas basados en software libre [https://eprints.rclis.org/24259/]. *ACIMED*, *18*(6).

Azhar, S. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. *Leadership and Management in Engineering*, *11*(3), 241-252. https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127

Blischak, J., Davenport, E., y Wilson, G. (2016). A Quick Introduction to Version Control with Git and GitHub. *PLOS Computational Biology*, *12*(1). https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1004668

Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., y Rosenberg, M. (2014). How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, *7*(1), 37-44. https://doi.org/10.5281/zenodo.1336426

Cuevas, A., Amarilla, A., y Corvalán, R. (2021). Ciencia y tecnología: una mirada desde la ingeniería. *Extensionismo, Innovación Y Transferencia Tecnológica*, *7*, 139-161. https://doi.org/10.30972/eitt.704772

Del Nagy, A., Areej, Y., y Anol, B. (2010). Adopción organizacional de software de código abierto: barreras y soluciones. *Communications of the ACM*, *53*(3), 148-151. https://doi.org/10.1145/1666420.1666457

Demirkesen, T. (2022). Investigación de los principales desafíos para la adopción de la Industria 4.0 entre las empresas de construcción. *Ingeniería, Construcción y Gestión Arquitectónica*, *29*(3), 1470-1503. https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2020-1059

Duparc, E., Steffen, B., VanDerValk, H., y Otto, B. (2025). Análisis estratégico del software de código abierto en industrias tradicionales: un análisis FODA. *Communications of the Association for Information Systems*, *57*, 1473-1498. https://doi.org/10.17705/1CAIS.05761

GanttProject. (2003). About GanttProject.

Grafana Labs. (s. f.). About Grafana.

Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M., y Fenves, G. (2006). *OpenSees command language manual*. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, UC Berkeley.

McKenna, F. (2011). OpenSees: A framework for earthquake engineering simulation. *Computing in Science & Engineering*, *13*(4), 58-66. https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.66

Niaros, V., Kostakis, V., y Drechsler, W. (2017). Making (in) the Smart City: The Emergence of Makerspaces. *Telematics and Informatics*, *34*(7), 1143-1152. https://doi.org/10.1016/j.tele.2017.05.004

Open Source Hardware Association. (s. f.). Open source hardware definition.

Pérez, M., y Vargas, I. (2018). *Evaluación de las aplicaciones project libre versus microsoft project en la programación de un proyecto de edificación* [Tesis de maestría, Universidad Católica de Colombia].

Ram, K. (2013). Git can facilitate greater reproducibility and increased transparency in science. *Source Code for Biology and Medicine*, *8*, 7. https://doi.org/10.1186/1751-0473-8-7

Regona, M., Yigitcanlar, T., Xia, B., y Li, R. (2022). Oportunidades y desafíos de la adopción de la IA en la industria de la construcción: una revisión PRISMA. *Revista de Innovación Abierta, Mercado Tecnológico y Complejidad*, *8*(1), 45. https://doi.org/10.3390/joitmc8010045

Rosas-Chavoya, M., Gallardo-Salazar, J., López-Serrano, P., Alcántara-Concepción, P., y León-Miranda, A. (2022). QGIS es un software geoespacial gratuito y de código

abierto en constante crecimiento que contribuye al desarrollo científico. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, *48*(1), 197-213. https://doi.org/10.18172/cig.5143

Stallman, R. (2004). *Software libre para una sociedad libre*. Traficantes de Sueños.

Tabarés, R. (2019). La fabricación abierta: ¿un camino alternativo a la industria 4.0? [https://ojs.revistacts.net/index.php/CTS/article/view/121]. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad*, *14*(41), 263-285.

Tayal, A., Agrawal, S., y Yadav, R. (2024). Implementación de la industria 4.0 en la industria de la construcción: una revisión. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, *15*(9), 4163-4182. https://doi.org/10.1007/s13198-024-02432-6

The FreeCAD Team. (2019). FreeCAD: Your own 3D parametric modeler.

The FreeCAD Team. (2022). External workbenches - FreeCAD Documentation.

Volk, R., Stengel, J., y Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings: Literature review and future needs. *Automation in Construction*, *38*, 109-127. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023

Estándares abiertos para sistemas de infraestructura crítica: Un enfoque hacia la soberanía tecnológica

Pablo Sulbarán[1]

Introducción

A manera de preámbulo, las tecnologías abiertas se pueden y deben justificar en términos de soberanía tecnológica como objetivo final estratégico de una nación. La soberanía tecnológica es la capacidad de una entidad política para desarrollar y gestionar de forma autónoma tecnologías e innovaciones, en términos de características (arquitectura, funcionalidades y seguridad, entre otros) y ámbitos de uso (March y Schieferdecker, 2021). En este sentido, la soberanía tecnológica es un objetivo estratégico que involucra esfuerzos enfocados en investigación y desarrollo (I+D), en pro de la generación de conocimiento científico, técnico e innovación en diversas áreas, cuyo control sea ejercido por parte de una nación, de tal manera que se logre prescindir de tecnologías foráneas. Sin embargo, ello no implica la fabricación de la totalidad absoluta de productos tecnológicos e infraestructuras, ya que sería imposible desenvolverse al margen y permanecer ajeno a la realidad tecnológica actual, la cual es evidentemente dominada por las grandes corporaciones, sino se trata mas bien del poder tomar decisiones clave en cuanto a implementaciones, migraciones y mejoras, sin estar condicionado a dependencias de ningún tipo. La soberanía tecnológica garantiza desarrollo, competitividad e innovación.

En este ensayo se realiza un breve bosquejo de soluciones ya probadas e implementadas en distintos entornos de infraestructura crítica, tomando en cuenta su valor estratégico en términos de soberanía tecnológica.

Clasificación de las tecnologías

Para abordar la soberanía tecnológica, resulta imprescindible distinguir entre dos grandes ámbitos: las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) y las Tecnologías Operativas (TO), ambas caracterizadas por su transversal impacto en el conocimiento y los procesos productivos. Las TIC constituyen un ecosistema integrado por una capa de hardware (computadores, servidores, redes y sistemas de transmisión) y una capa de software (programas, sistemas operativos y aplicaciones), que conjuntamente con los datos generados han generado una comunicación instantánea en actividades humanas de cualquier índole.

Por su parte, las TO agrupan los dispositivos de medición, supervisión y control empleados en los procesos de infraestructura crítica con el objeto de automatizar los mismos.

[1]Ingeniero de Sistemas egresado de la Universidad de Los Andes. Actualmente, se desempeña como Analista de Desarrollo en el Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL). Autor de publicaciones académicas y de divulgación científica. psulbaran@cenditel.gob.ve

Al igual que las TIC, se articulan en tres niveles: una capa física o de hardware, asociada directamente a las operaciones de campo; una capa de datos, compuesta por los valores que emiten los equipos y que se transmiten a los ordenadores de las salas de control; y una capa de software, presente tanto en los dispositivos electrónicos industriales como en las plataformas de supervisión de los procesos. Las TO abarcan sistemas físicos esenciales para el funcionamiento de un país, como sistemas de control automático, telecomunicaciones, agricultura inteligente, sistemas de transporte, manufactura, salud, seguridad y defensa de una nación, entre otros. En su desarrollo convergen estrechamente la ciencia y la ingeniería para el desarrollo de soluciones tecnológicas eficaces y eficientes.

Sistemas de Control Industrial (SCI)

Particularmente, los SCI comprenden una gama de tecnologías asociadas al control automático de procesos físicos y químicos, a menudo encontradas en todos los sectores industriales y de infraestructura crítica (Cossio, 2020). El objetivo principal de estos sistemas es la regulación, control y sintonización de las variables que intervienen en esos mecanismos, utilizando infraestructuras de hardware y software que conducen a la automatización de estos procesos, minimizando la intervención humana, o en su defecto, limitándose ésta a la toma de decisiones. En este orden de ideas, los SCI abarcan todos los niveles del esquema clásico de automatización, es decir, desde su acoplamiento directo a los elementos de planta hasta los niveles de monitoreo y supervisión en las salas de control.

Los SCI están conformados por sensores, hardware y software cuya interacción se basa en la ejecución de bucles de control, diagnósticos remotos, herramientas de mantenimiento e interfaces humanas basadas en arquitecturas de red dispuestas en capas siguiendo diversos protocolos (Nankya et al., 2023). En general, los SCI integran los siguientes elementos:

- Controlador Lógico Programable (*Programmable Logic Controller*, PLC).
- Control Supervisor y Adquisición de Datos (*Supervisory Control And Data Acquisition*, SCADA).
- Unidades de Terminal Remota (*Remote Terminal Unit*, RTU).
- Interfaces Humano-Máquina (*Human-Machine Interface*, HMI).
- Sistemas de Control Distribuidos (SCD).
- Buses de campo.

Convergencia TIC/TO

La integración de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) con las Tecnologías de Operación (TO) se fundamenta en la implementación de sistemas computacionales que procesan los datos adquiridos de los dispositivos de TO, cuya función es el control directo de eventos y procesos de planta. La convergencia entre las TIC y

las TO se hace cada vez más estrecha debido a los adelantos tecnológicos, los cuales han permitido elevados niveles de digitalización y conectividad. Los avances en tecnologías como el Internet de las Cosas (*IoT*) y el análisis de *Big Data* están permitiendo sistemáticamente que el ámbito de la información digital se vincule aún mejor con el mundo operativo físico (Bigelow y Lutkevich, 2024).

En la Figura 1, se ilustra un diagrama que determina la integración de TI con TO, donde se asume que las tecnologías de comunicación van implícitas a la transmisión de los datos:

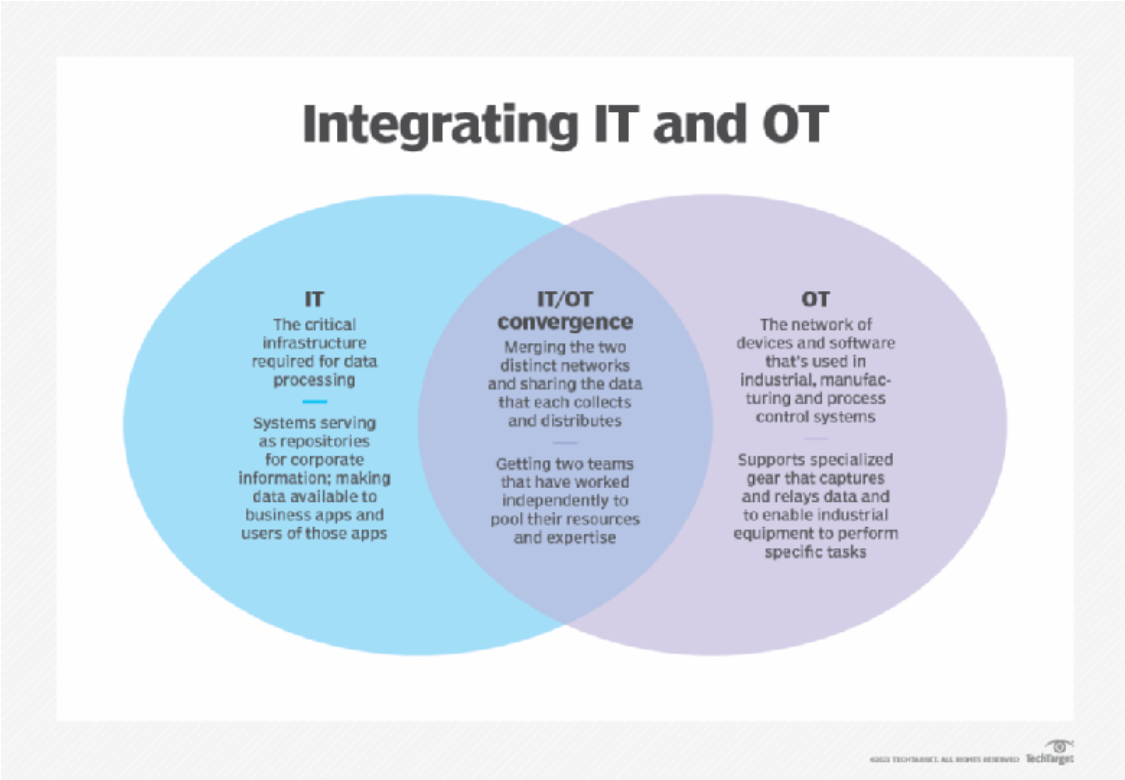


Figura 1: Integración TI con TO.
Fuente: Bigelow y Lutkevich (2024).

En virtud de la convergencia TIC / TO, es evidente que en los SCI se implementan soluciones de hardware y software inherente a la automatización de procesos, siendo las más importantes:

- PLC
- RTU
- SCADA

PLC

Un PLC es un dispositivo utilizado en la industria para controlar y automatizar procesos. Está diseñado para gestionar operaciones en tiempo real y puede programarse para realizar

tareas específicas, como encender y apagar motores, monitorear sensores y automatizar líneas de producción (Siemens PLC Guides, 2025). Se trata de un computador robusto diseñado para funcionar en condiciones extremas de planta, sometido a grandes impactos y altas vibraciones, operando en un amplio rango de temperatura. El diseño, programación y puesta en marcha de los PLC está normalizado por el estándar IEC 61131. En este orden de ideas, Sulbarán (2025) describe la arquitectura básica de los PLC:

- **Unidad Central de Procesamiento (CPU):** Ejecuta las instrucciones almacenadas en memoria mediante operaciones aritméticas y lógicas. Se conecta con los módulos de entrada y salida.
- **Módulos de entrada:** Captura las señales del entorno físico, las cuales provienen de sensores y son convertidas en señales digitales para ser procesadas en la CPU.
- **Módulos de salida:** Reciben señales de control digitales provenientes del CPU para luego ser emitidas a los actuadores de planta.
- **Fuente de alimentación:** Distribuye energía a cada componente del PLC.
- **Interfaces de comunicación:** Son puertos que permiten, a través de protocolos, la comunicación con otras plataformas de SCI como interfaces hombre-máquina (HMI), sistemas SCADA y otros PLC.

RTU

Son dispositivos de control, cuya unidad de procesamiento es el microcontrolador y operan directamente en planta. Se conectan de manera directa a los elementos de campo tales como sensores, actuadores e interruptores. La diferencia principal respecto a los PLC es que están diseñados para operar desde grandes distancias, razón por la cual se basan en telemetría. Las RTU se programan mediante una interfaz de navegador *web* simple, mientras que los PLC reciben instrucciones en lenguaje *Ladder* o de escalera. Por otra parte, estos dispositivos están diseñados para operar en entornos industriales de condiciones físicas extremas, tales como niveles de humedad elevados e intervalos de temperatura sumamente grandes. Son compatibles con protocolos de comunicación industrial comunes como Modbus, Profibus y DNP3. Además, pueden utilizar tecnologías de comunicación Ethernet, serie (como RS-232 y RS-485) e inalámbricas (Mikrodev, 2025).

La arquitectura de una RTU consiste en los siguientes módulos:

- Módulo de entrada, el cual recibe los datos provenientes de la planta.
- Módulo de control, encargado de realizar el registro, recepción y transmisión de los comandos de control emitido desde la unidad central o sistema supervisorio.
- Módulo de procesamiento de información (CPU), que consta de una serie de registros asociados a los datos adquiridos en campo o aquellos generados desde la unidad central.

- Módulo de comunicaciones, cuyas funciones son la codificación, decodificación y transmisión de los datos de todo el proceso de control.

La RTU realiza mediciones constantes de las variables controladas, transmitiendo la información capturada a la sala de control central y viceversa mediante múltiples sistemas de comunicación con sus respectivos protocolos: Ethernet, UHF / VHF, satélite, fibra óptica, entre otros, usando puertos auxiliares con otras unidades remotas.

SCADA

Nasby (2019, p. 10) resalta que, el 5 de Mayo del 2017, un comité de la International Society of Automation, a propósito de establecer la norma ISA-112, estandarizó el concepto de SCADA: un sistema constituido como una combinación de hardware y software utilizado para enviar comandos y adquirir datos con el fin de supervisar y controlar sistemas. Se trata de una plataforma que integra tanto hardware como software, cuya función es el monitoreo de procesos físicos con el fin de aplicar el control automático del mismo mediante la adquisición de datos en tiempo real. Los SCADA se instalan en una sala de control remota, desde la cual se supervisa cada uno de los elementos del sistema a controlar, sin importar la distancia de donde se encuentren. En la clásica conceptualización de la pirámide de automatización, SCADA está situado en un nivel superior a los dispositivos descritos en la sección anterior.

En este contexto, el SCADA funciona en la unidad maestra, desde la cual se supervisan los distintos procesos en cuestión. Básicamente, los datos recuperados de planta se transmiten hasta la HMI, la cual visualiza y almacena información relevante de ese instante. Desde la HMI se visualiza el rendimiento de los procesos, se realizan ajustes de sintonización, y se gestionan las alarmas, siendo éste último aspecto muy importante para la detección de fallas. Esta arquitectura de automatización por capas garantiza la ejecución de las tareas críticas, enviando instrucciones a los PLC y las RTU, al mismo tiempo que el SCADA monitorea y analiza los datos en tiempo real del sistema a controlar. Este tipo de plataforma ha demostrado un desempeño eficiente en sistemas de control automáticos de cualquier escala y complejidad.

En virtud de la descripción general dada en los apartados anteriores, es crucial resaltar que dichas tecnologías son de carácter propietario, lo cual constituye una vulnerabilidad en términos de desarrollo, soberanía e innovación, trayendo como consecuencia una alta dependencia de organizaciones foráneas y elevación de costos operativos. En consecuencia, emerge el enfoque *Open Source* como alternativa a los desarrollos restrictivos propietarios, surgiendo, además, dos vertientes derivadas para lograr la apertura de conocimiento: el *open hardware* (denominado también hardware libre) y el software libre (*free software*).

El enfoque Open Source

El enfoque *Open Source* es una filosofía que surge para hacer frente a las tecnologías propietarias, sus restricciones e imposiciones inherentes, siendo así un modelo de negocios alternativo cuyo fin es eliminar cualquier tipo de dependencias de carácter privativo. Si bien es cierto que *Open Source* está estrechamente ligado a la noción de código abierto, es necesario recalcar los principios enunciados por Red Hat (2026):

- **Transparencia:** Es importante el libre acceso a la información y a los recursos necesarios para llevar acabo cualquier desarrollo tecnológico, de esa forma se toma como punto de partida los conocimientos previos para generar nuevos productos.
- **Colaboración:** La libertad de participación garantiza el mejoramiento del trabajo de otras personas, para ello es necesario el acceso a los conocimientos compartidos.
- **Prontitud y frecuencia:** Es menester lanzar soluciones tempranas y probadas en entornos reales, con el objeto de lograr una realimentación a partir de posibles fallas, de esta forma el proyecto evoluciona de manera ágil.
- **Meritocracia inclusiva:** Se refiere al prevalecimiento de los aportes, independientemente del rango que tengan los participantes del proyecto.
- **Comunidad:** La diversidad de puntos de vistas enriquecen las soluciones, tomando distintas perspectivas para lograr objetivos comunes.

Software Open Source

Es el software cuyo código fuente se desarrolla y mantiene a través de una colaboración abierta. En este caso, puede usar, examinar, alterar y redistribuir el código abierto como mejor le parezca, normalmente sin costo alguno (IBM, 2026). Por su parte, la Open Source Initiative (2024) enfatiza una serie de criterios para definir el software de código abierto, los cuales se mencionan a continuación:

- Redistribución libre.
- Código fuente.
- Obras derivadas.
- Integridad del código fuente del autor.
- No se discriminará a ninguna persona ni grupo.
- Distribución de la licencia.
- La licencia no debe ser específica para un producto.
- La licencia no debe restringir otro software.
- La licencia debe ser tecnológicamente neutral.

Un aspecto a considerar es que el software de código abierto no necesariamente es gratuito, puede haber sido desarrollado con fines comerciales, siempre y cuando se cumplan los criterios ya mencionados.

Software libre

Es el software que respeta la libertad de los usuarios y la comunidad. Dicha libertad está referida a la ejecución, copia, distribución, estudio, modificación y mejoramiento del software. En tal sentido, el fundamento es la libertad y no el precio (Free Software Foundation, 2026). La diferencia con el software *Open Source* estriba en motivos de índole social y ética, haciendo énfasis en las libertades del usuario y la caracterización de licencias.

Hardware libre

El *Open Source Hardware*, en español hardware abierto, también denominado con frecuencia hardware libre, es un enfoque que extrapola los elementos del *Open Source* a los dispositivos electrónicos físicos en una amplia gama de aplicaciones. A juicio de la Open Source Hardware Association (2024), el hardware abierto es un término que se refiere a elementos tangibles —máquinas, dispositivos u otros objetos físicos— cuyo diseño se da a conocer al público de tal manera que cualquier persona pueda elaborarlos, modificarles, distribuirlos y utilizarlos. Esta filosofía es complementada por la norma diseñada por el Instituto Alemán de Normalización (*Deutsches Institut für Normung*, por sus siglas en alemán), donde se plantean cuatro derechos que son análogos a las libertades del software libre. Según la DIN SPEC 3105 (2020), los cuatro derechos que establecen el criterio de hardware abierto son:

- Derecho de estudio.
- Derecho a modificación.
- Derecho de fabricación.
- Derecho de distribución.

Dicha norma se sustenta, a su vez, de los criterios de documentación específicos para la tecnología de hardware de código abierto, cuyas bases son los requisitos por pieza y una ontología en términos de partes, licencias y planos. Los requisitos están organizados en módulos, que luego son integrados a una base de datos (Open Source Hardware Association, 2024).

Es conveniente resaltar que esta normalización hace énfasis en que el hardware no pasará a ser distribuido de forma comercial sin antes haberse hecho una inspección profesional previa y de manera rigurosa, reteniéndolo a entornos no críticos en términos de seguridad, lo que conlleva a la asunción de riesgos en dicha materia. Al igual que el software de código

abierto, el código fuente del hardware abierto (esquemas, planos, diseños lógicos, dibujos o archivos de diseño asistido por ordenador, etc.) está disponible para su modificación o mejora por cualquier persona bajo licencias permisivas (Red Hat, 2026).

Soluciones tecnológicas de hardware y software Open Source a los SCI

En la actualidad, se cuenta con un amplio ecosistema de hardware y software *Open Source* aplicado al control y automatización de procesos industriales, con la enorme ventaja de la disponibilidad de códigos de programación y esquemas de placas electrónicas, garantizando el perfeccionamiento, escalabilidad y uso abierto de esas tecnologías. En este sentido, se van a describir de manera general las siguientes soluciones implementadas en ámbitos industriales y de investigación:

Arduino

Es una plataforma de hardware y software de código abierto orientada al desarrollo de prototipos para la industria, la investigación y la innovación. El proyecto Arduino tiene como propósito el diseño, fabricación y soporte de dispositivos electrónicos y software, lo que permite a personas de todo el mundo acceder fácilmente a tecnologías avanzadas que interactúan con el mundo físico (Arduino, 2026a). Arduino cuenta con una comunidad numerosa a nivel mundial y todos sus proyectos disponen de documentación abierta. En la actualidad, numerosas soluciones basadas en Arduino se han implementado en entornos industriales para control y automatización, en procesos como adquisición de datos, integración con SCADA y aplicaciones de Internet Industrial de las Cosas (*Industrial Internet of Things*, IIoT). Utiliza protocolos de comunicación industrial como Modbus RTU/RS-485 y Modbus TCP/Ethernet. Además, placas específicas como Arduino Opta y su PLC IDE permiten programar con lenguajes estandarizados para PLC según la norma IEC 61131-3, como *Ladder*, *Function Block Diagram* y *Structured Text*.

A continuación, se enumeran algunas de las implementaciones documentadas de Arduino:

- **Arduino PLC IDE:** Es un entorno de programación para los dispositivos Arduino Opta y Portenta Machine Control, los cuales funcionan como PLC. Sus lenguajes de programación siguen la norma IEC 61131-3 y se comunican con otros elementos con los protocolos industriales Modbus RTU, Modbus TCP y CANopen.
- **Arduino Pro / Arduino Pro Opta:** Es un hardware diseñado para operar como micro-PLC, ejecutando control en tiempo real, monitoreo, mantenimiento predictivo y automatización de maquinarias y procesos. Consta de un microcontrolador STM32H747XI de doble núcleo Arm® Cortex®-M7 + M4 que permite a los usuarios realizar control en tiempo real, monitoreo e implementar aplicaciones de mantenimiento predictivo (Arduino, 2026b).

- **Portenta Machine Control:** Es una unidad de control industrial totalmente centralizada y de bajo consumo, capaz de controlar equipos y maquinaria. Se puede programar utilizando el entorno Arduino u otras plataformas de desarrollo embebidas (Arduino, 2026c).

Raspberry Pi

Es un tipo de computador de tamaño reducido y bajo consumo energético desarrollado en el Reino Unido por la Raspberry Pi Foundation. Se trata de un computador construido bajo estándares abiertos, de arquitectura monoplaca y puertos para conectar periféricos, tales como teclados, ratón y monitor. Consta de un sistema operativo basado en la distribución Linux Debian y es compatible con más de 69 000 paquetes de Debian. Raspberry Pi sigue una versión escalonada del ciclo de lanzamiento de Debian (Raspberry PI OS, 2026). Su versatilidad se debe a una arquitectura abierta que lo hacen adaptable al desempeño de funciones aplicadas al control automático, fungiendo de PLC, RTU e inclusive, Unidad Terminal Maestra (MTU). En este contexto, se listan algunas de las implementaciones a los SCI de Raspberry Pi:

- **Raspberry Pi PLC 38R:** Es un PLC desarrollado por Industrial Shields. Consiste en un computador Raspberry Pi 4 conectado a entradas y salidas tanto digitales como analógicas, y 16 relés. Se comunica mediante protocolos como Modbus RTU sobre RS-485, además de conectividad Wi-Fi y Ethernet. Está diseñado para aplicarse a gestión energética, edificios inteligentes, monitorización del agua y control industrial, ofreciendo el equilibrio ideal entre rendimiento, conectividad y capacidad de E/S (Industrial Shields, 2024).
- **EDATEC ED-IPC3100:** Desarrollado por EDA Technology. Es un controlador industrial compacto basado en Raspberry Pi CM5, diseñado para entornos industriales exigentes en automatización, computación en el borde e IoT. Ideal para la adquisición de datos, la conectividad de dispositivos y el control ligero (EdaTech, 2026).
- **OpenPLC sobre Raspberry Pi:** OpenPLC es una solución de software libre que consta de dos capas: un IDE para programación y un *Runtime*, siendo este último elemento el que ejecuta el programa de control y gestiona las entradas y salidas del sistema (OpenPLC_v3, 2026). OpenPLC se basa en lenguajes asociados a la norma IEC 61131-3, incluyendo, entre otros, *Ladder Diagram* (LD), *Function Block Diagram* (FBD) y *Structured Text* (ST). OpenPLC incluye una funcionalidad de instalación específica para Raspberry Pi, llamada `rpi`, y una capa de hardware que permite al *runtime* comunicarse con los pines GPIO de la placa.

Implementaciones de tecnologías libres aplicadas a los SCI

Las TO/TIC diseñadas bajo estándares abiertos se implementan a infraestructuras críticas de suma importancia, tales como la industria petrolera, producción de gas, oleoductos, estaciones eléctricas, plantas de potabilización de agua, redes de distribución de agua, entre otros, con el fin de supervisar y controlar variables inherentes a dichos procesos.

En este sentido se va a realizar una recopilación de algunas soluciones de TO/TI aplicadas en diversos lugares, describiendo su arquitectura y funcionamiento. En esta sección se va a realizar una breve descripción de tres sistemas de control basados en enfoque *open source* para automatizar procesos críticos:

- Sector petrolero (Venezuela)
- Energía eléctrica (Canadá)
- Agua potable (Indonesia)

Industria petrolera: PDVSA GALBA

En Venezuela se tiene implementado un sistema SCADA en la principal industria estatal del país, Petróleos de Venezuela, S.A. (PDVSA), denominado PDVSA GALBA (PDVSA Guardianes del Alba), cuyo objetivo es el monitoreo, control y supervisión en tiempo real de la producción de crudo y gas, generando información de las variables pertenecientes a dichos procesos.

El SCADA GALBA consiste en un software que integra las funcionalidades de alto nivel asociadas a la supervisión y control de procesos, utilizando para ello una arquitectura basada en módulos, la cual es escalable para aplicaciones de gran envergadura (Ronceros et al., 2022). Este sistema ha sido desarrollado por especialistas del Centro de Informática Industrial (CEDIN), adscrito a la Universidad de las Ciencias Informáticas (UCI) en La Habana, Cuba; y el departamento de Automática, Informática y Telecomunicaciones (AIT) de PDVSA en Venezuela.

Las funcionalidades del SCADA GALBA son: supervisión y control remoto de las instalaciones, procesamiento de datos en tiempo real, generación de gráficos dinámicos, producción de reportes, manejo de alarmas, entre otros; todos estos elementos van en conexión con la Base de Datos Histórica. Las variables supervisadas por el sistema son: nivel, flujo, presión, temperatura, intensidad de la corriente, tensión, potencia eléctrica, entre otras, las cuales son captadas por los dispositivos de control en campo; seguidamente, dichas señales son transformadas en datos para el software, los cuales pueden ser de tipo simple (enteros, flotantes, caracteres, etc.), o bien, tipo de datos complejos tales como clases.

Arquitectura de SCADA GALBA

Antunez y Valle (2015) señala que el sistema consta de módulos reutilizables bajo un esquema distribuido, donde los componentes se ejecutan en cada uno de los nodos físicos de la red, los cuales están interconectados mediante una capa de comunicaciones. Con base a esta descripción, el sistema está estructurado de la siguiente manera:

- ***Middleware*:** Es la capa que permite la comunicación entre todos los dispositivos de campo y la aplicación que supervisa procesos.

- **Adquisición y Procesamiento:** Determina los procesos de lectura y escritura sobre los dispositivos. En este renglón se encuentran los controladores o *drivers*, cuya función es traducir señales, de tal manera que el sistema operativo pueda reconocer, controlar y comunicarse con un componente de campo y así poder transmitir datos entre la red de computadores.
- **Configuración:** Esta funcionalidad permite al usuario establecer criterios para los procesos, determinar las variables, ajustar los controladores, definir comandos, alarmas y otros aspectos críticos.
- **Visualización:** Es la interfaz gráfica que permite acceder a los datos del servidor desde cualquier computador acoplado a la red, con el objeto de supervisar los procesos de la planta. Además, consta de un submódulo de reportes, el cual puede emitir informes referentes a determinado evento.
- **Histórico de Base de Datos:** Se encarga del manejo, recuperación y respaldo de los datos captados en planta, para luego ser utilizados en los análisis y posterior toma de decisiones.
- **Seguridad:** Es la capa encargada de la protección de los datos y el software como tal. Posee herramientas de protección ante ataques maliciosos, intentos de intrusión o accesos no autorizados.
- **Módulo de Comunicación:** Este componente permite la comunicación con sistemas externos tales como otros SCADA, servicios y aplicaciones de diversa índole.
- **Planificador de tareas:** En este módulo se ejecutan algunos *scripts* que complementan el funcionamiento del sistema.

A continuación, se muestran en la Figura 2, cada uno de los componentes que integran la plataforma de control y adquisición de datos de planta:

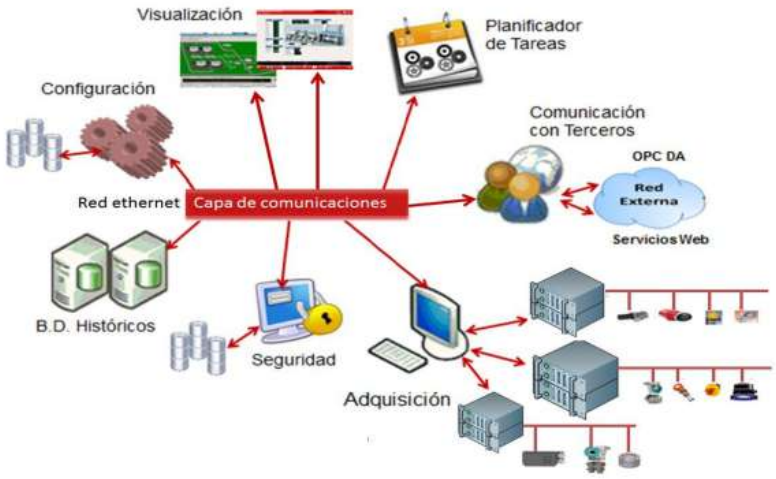


Figura 2: Representación gráfica de la arquitectura de SCADA GALBA.
Fuente: Antunez y Valle (2015)

Generación de energía eléctrica: Control y supervisión de un sistema fotovoltaico conectado en red

Esta solución tecnológica consiste en un SCADA de bajo costo y de código abierto propuesto por Ahsan et al. (2022), el cual fue desarrollado en la Memorial University of Newfoundland, Canadá. El sistema fue implementado para el control y supervisión de una planta fotovoltaica de gran envergadura que se conecta a la red eléctrica. La plataforma está basada en la aplicación *web* de código abierto *EmonCMS*, cuya función es el procesamiento y visualización de variables físicas capturadas por los dispositivos de campo. Los datos que se generan en los procesos inherentes a la planta fotovoltaica son adquiridos por hardware de bajo costo, como lo son *Arduino* y *Raspberry Pi*, los cuales, a su vez, transmiten al servidor de control y monitoreo. El histórico de la información procesada puede ser visualizado a través de un panel de control bastante intuitivo (Ahsan et al., 2022). La implementación de esta plataforma de código abierto tiene como finalidad optimizar la salida del inversor de la planta fotovoltaica y obtener energía de forma eficiente (Emoncms, 2026).

Arquitectura del sistema de control para la planta fotovoltaica

La plataforma está estructurada por un servidor donde se despliega la aplicación *EmonCMS*, encargada del procesamiento y almacenamiento de la información obtenida de planta; además se tienen los RTU, sensores y MTU.

Capa de software

Se implementa *EmonCMS*. Consiste en una aplicación *web open source* encargada del procesamiento, registro y visualización de variables de energía, temperatura y otros datos ambientales. Es desarrollado por el proyecto *OpenEnergyMonitor*, grupo especializado en monitorización de electricidad, energía solar, almacenamiento de energía y bombas de calor en entornos industriales. La arquitectura de *EmonCMS* es una combinación de un controlador frontal en el servidor, un patrón de diseño modelo-vista-controlador y una estructura de directorios que facilita la adición de funcionalidades de forma modular y autónoma (Emoncms, 2026).

EmonCMS está estructurado de un componente del lado del servidor y otro del lado del cliente, con un enfoque muy similar a los *frameworks* tradicionales. El código del componente del lado del servidor está escrito en lenguaje de programación *PHP*, mientras que el del lado del cliente tiene como base el lenguaje *HTML* combinado con estilos *CSS* y *JavaScript*. Este componente del lado del cliente se suele denominar "vista" en *EmonCMS*. El controlador del lado del servidor define la API *HTTP* y proporciona la ruta para cargar la vista. Los modelos suelen implementar una clase que define e implementa la interacción con la base de datos subyacente.

Por otra parte, la aplicación minimiza el uso de plantillas *PHP*; por consiguiente, el contenido dinámico es renderizado e interactúa con la API del servidor mediante *JavaScript*, *jQuery* y *Vue.js*. Los datos se transmiten al servidor en formato *JSON*. La API del servidor

también es utilizada directamente por los equipos de monitorización de energía para enviar datos a la aplicación. La base de datos es gestionada por *MySQL*.

Capa de hardware

El hardware utilizado en este sistema de control está conformado por sensores de campo, las RTU y la unidad terminal maestra. Uno de los dispositivos cruciales del sistema es el microcontrolador *Arduino Mega 2560*, el cual capta los datos de todos los instrumentos de campo, los procesa y posteriormente transmite a un servidor basado en *Raspberry Pi*. Seguidamente, el software *EmonCMS* toma los datos del puerto de la *Raspberry Pi* y guarda los registros junto con la visualización en la pantalla de la HMI. A continuación, con base al trabajo de Ahsan et al. (2022), se dará una breve descripción de cada elemento.

Sensores

En este sistema de control, Ahsan et al. (2022) describen tres categorías de sensores: sensores de corriente y voltaje en corriente continua (DC), sensores de corriente y voltaje en corriente alterna (AC), y sensores ambientales. Para la medición de señales DC, se utilizan los transductores CR5210 (corriente) y CR5310 (voltaje), ambos con salida analógica de 0 a 5 V, linealmente proporcional a la magnitud medida. Para las señales AC, se emplean los dispositivos CR4500 (corriente) y CR4310 (voltaje), cuya salida también es una señal continua de 0 a 5 V, lineal con el parámetro de entrada, y requieren una alimentación externa de 24 V. Por último, los sensores ambientales incluyen el módulo DHT11, el cual mide temperatura y humedad de forma simultánea, variables que afectan directamente el rendimiento y la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos, junto con la irradiancia normal directa (DNI) y la irradiancia horizontal global (GHI).

RTU

En esta categoría de hardware se emplea el microcontrolador *Arduino Mega*, basado en el ATmega2560 (Figura 3), destacado por su bajo costo y reducido consumo energético. Ahsan et al. (2022) resaltan que este dispositivo dispone de 54 pines digitales de entrada/salida (15 de ellos configurables como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 puertos UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*, por sus siglas en inglés), un oscilador de cristal de 16 MHz, un conector ICSP para programación en serie y un botón de reinicio. Su rango de alimentación es de 7 a 20 V, lo que permite su operación mediante cable USB, batería de litio o cualquier fuente externa. En cuanto a memoria, incorpora 256 KB de memoria flash, 8 KB de SRAM y 4 KB de EEPROM. La programación se realiza a través del Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) de *Arduino*, que proporciona rutinas y bibliotecas basadas en los lenguajes C y C++. Los programas, denominados “sketches”, se escriben en el IDE para medir los parámetros de los instrumentos de campo, y la comunicación con la computadora se establece mediante un cable USB tipo A/B, que también permite la programación del dispositivo.

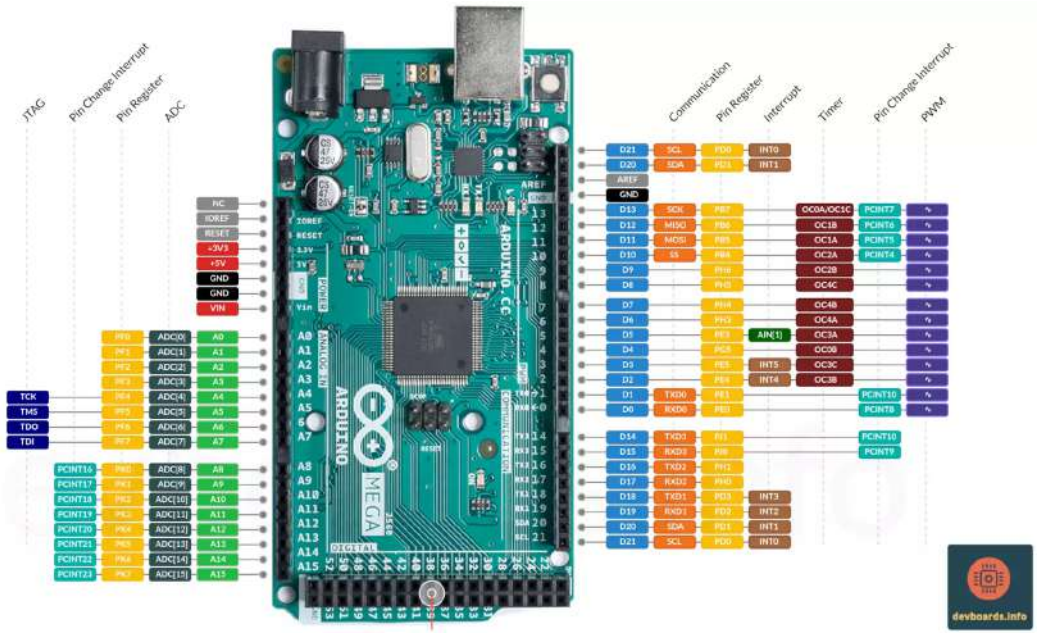


Figura 3: Arduino Mega 2560 Rev3 con su diagrama de pines.
Fuente: Devboards (2025)

MTU

La MTU es un dispositivo *Raspberry*; se trata de una pequeña computadora de placa única, de un amplio uso en el diseño basado en hardware abierto, cuyas aplicaciones van desde pequeños prototipos hasta el control industrial de alta envergadura. Requiere un sistema operativo (SO), generalmente Raspbian, para llevar a cabo las operaciones. La principal ventaja de la MTU es que cualquier computadora puede transformarse en una *Raspberry Pi* según sea necesario. En el caso estudiado por Ahsan et al. (2022), se implementó un computador con procesador Core i3 y se instaló Debian como sistema operativo para esta PC. La información es visualizada en una pantalla de 15.60″ y los elementos de la placa principal cuentan con las siguientes especificaciones:

- Una CPU Intel x86 de cuatro núcleos a 1.90 GHz;
- 500 GB de ROM;
- 4 GB de RAM;
- Ethernet 100 Base;
- Tres puertos USB (2 USB 3.2 y 1 USB 2.0);
- Puerto HDMI completo;
- Ranura para tarjeta micro SD;
- Núcleo gráfico 3D VideoCore IV.

En la Figura 4, se muestra la configuración de los elementos del hardware utilizado en el sistema de control de la planta fotovoltaica, en el cual se aprecia un servidor local que funge de HMI, las RTU como unidades de adquisición de datos, un multímetro digital para las respectivas mediciones eléctricas y un transformador de corriente alterna:

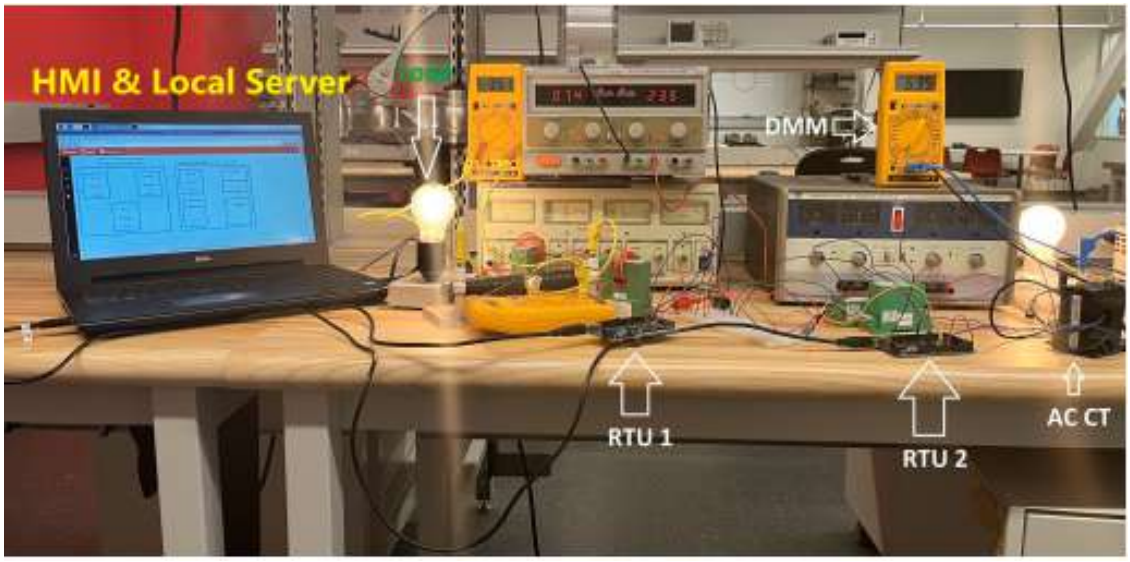


Figura 4: Hardware del SCADA aplicado a la planta fotovoltaica.
Fuente: Ahsan et al. (2022)

En resumen, se trata de un proyecto de alta viabilidad tanto en términos de costos, código disponible y hardware abierto, que puede ser la base de futuras implementaciones en otras regiones del mundo.

Caso de uso: Tratamiento de agua potable

Este proyecto, propuesto por Larasati et al. (2021) e implementado en Indonesia, consiste en un SCADA de bajo costo, cuya función es monitorear y controlar el proceso de filtración en una planta de tratamiento de agua. El objetivo del sistema de control es automatizar procesos inherentes al tratamiento de agua, tales como el filtrado de la misma para aislar las partículas sólidas, seguidamente la regulación de los niveles de pH. Cabe destacar que, en el tratamiento del agua para consumo humano, se realizan varios procesos físico-químicos, tales como la coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección del agua hasta alcanzar un grado de pureza y que sea apta para el consumo humano. El sistema propuesto realiza de manera automática el filtrado, de forma remota y sin intervención humana. La *Raspberry Pi* es el dispositivo principal que ejecuta la programación del SCADA en el proceso de filtración, acoplado a otros componentes, como una bomba y el sensor SKU:SEN0161 (Larasati et al., 2021). La bomba se encarga de mover el agua, mientras que el SKU:SEN0161 realiza la medición del pH del agua una vez filtrada.

Arquitectura del hardware

Los equipos de control y monitoreo del sistema automatizado son los siguientes:

- El computador *Raspberry Pi*, que funciona como MTU, es el encargado de enviar las instrucciones a los sensores y los relés. Además, contiene la programación para visualizar vía *web* los procesos en cuestión.
- Dispositivos de visualización remota como computadoras portátiles o teléfonos inteligentes, mediante los cuales se ejecuta el navegador *web* y por ende se muestran los resultados finales junto con los datos sobre la adquisición de los valores de pH.

Por otra parte, se instala a nivel de campo:

- Sensor con referencia SEN0161 para medir el valor de pH del agua.
- Relés y bombas para controlar la entrada y la descarga de agua en el proceso de filtración.

El diseño del SCADA propuesto por Larasati et al. (2021) para el proceso de filtración basado en la *web* se muestra en la Figura 5:

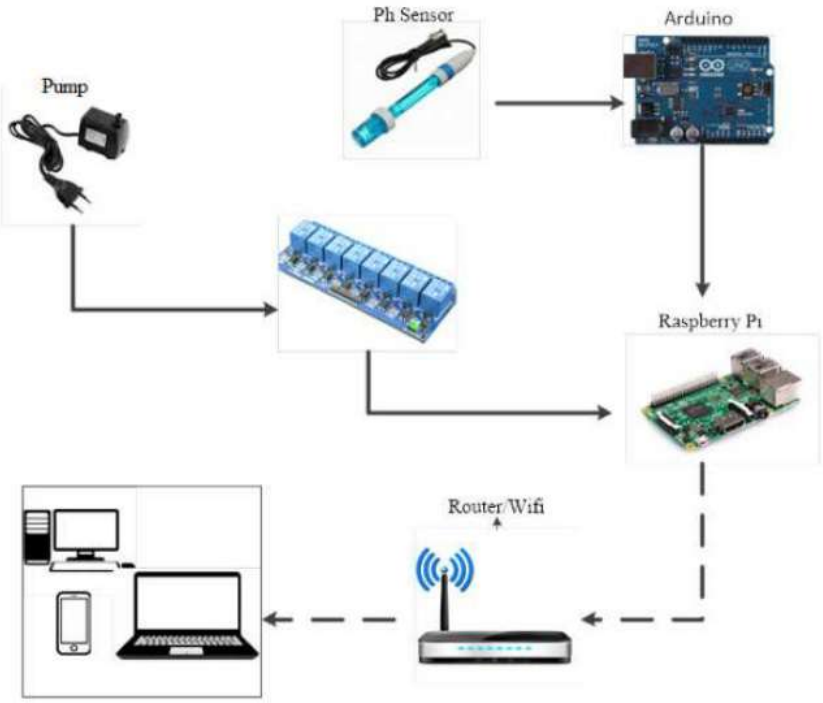


Figura 5: Descripción gráfica de la arquitectura de hardware del sistema de control de tratamiento de agua.

Fuente: Larasati et al. (2021)

Arquitectura del software

El software asociado al SCADA en cuestión está estructurado en varias capas, donde cada una de ellas se basa en un lenguaje de programación específico de acuerdo a su función, tal y como se detalla a continuación:

- El IDE de *Arduino*, escrito en lenguaje C, cuya funcionalidad consiste en enviar instrucciones para los dispositivos *Arduino* y activar la función del sensor de pH.
- *Scripts* elaborados en *Python*, encargados de enviar los valores de pH del agua a la base de datos y configurar la función del relé.
- Motor de bases de datos *MySQL*, el cual se conecta a un servidor de aplicaciones que, a su vez, almacenará el valor de pH obtenido.
- Editor de código fuente *Atom*.
- Lenguaje *HTML* para las plantillas *web* de la interfaz.
- Visualizador del lado del cliente *VNC*, desde el cual se pueden controlar otras computadoras a través de una conexión a Internet de manera remota.

En la Figura 6, Larasati et al. (2021) describen mediante un diagrama de flujo el algoritmo general del proceso de control:

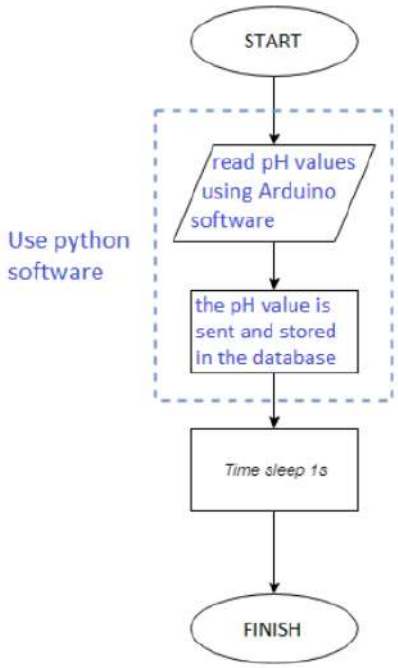


Figura 6: Diagrama de flujo descriptivo del algoritmo general del sistema de tratamiento de agua.

Fuente: Larasati et al. (2021).

En síntesis, la *Raspberry Pi*, actuando como Unidad Terminal Maestra (MTU), se encarga de gestionar las entradas y salidas del sistema mediante la supervisión y adquisición de datos. La entrada principal corresponde al sensor de pH, mientras que las salidas están constituidas por las señales de control enviadas al relé y a la bomba. Para ello, se emplean *scripts* en *Python* que permiten tanto la lectura de los valores del sensor de pH como el control de los actuadores durante el proceso de filtración. Una vez procesadas las señales, la MTU envía los datos recopilados a la base de datos, desde donde pueden ser visualizados en tiempo real a través de interfaces *web*.

Resumen comparativo de las tecnologías abiertas para SCI en estudio

La implementación de soluciones bajo estándares abiertos tiene un impacto en el ámbito de aplicación. Para ello, en la Tabla 1 se realiza una comparativa con los tres casos de estudio analizados, en términos de tecnologías utilizadas, funcionalidades y beneficios:

Tabla 1: Comparativa de los tres casos de estudio de SCI bajo estándares abiertos.

Sistema	**Hardware**	**Software y lenguajes de programación**	**País**	**Funcionalidades y beneficios**
PDVSA GALBA	Hardware propietario	* Software SCADA modular y distribuido. * Lenguajes de programación: C++, Python, Java. * Framework QT (basado en C++).	Venezuela, con colaboración de Cuba (CEDIN-UCI y AIT PDVSA).	Monitoreo, control y supervisión en tiempo real de la producción de crudo y gas. Desarrollo conjunto para la principal industria estatal del país.
SCADA para sistema fotovoltaico conectado a red	* Arduino Mega 2560. * RaspberryPI. * Sensores CR5210, CR5310, CR4500, CR4310 y DHT11. * Multímetro digital. * Transformador de corriente alterna.	* EmonCMS (aplicación web). * Scripts en PHP, HTML, CSS, JavaScript. * Frameworks como jQuery, VueJS. * Motor de base de datos: MySQL. * Arduino IDE, C/C++. S.O. Debian.	Canadá (Memorial University of Newfoundland).	Alta viabilidad por costos, código disponible y hardware abierto. Proyecto con posibilidad de ser escalable.
SCADA para tratamiento de agua potable	* RaspberryPi como MTU. * Sensor de pH SKU:SEN0161. * Relés y bombas. * Dispositivos de visualización remota.	* RaspberryPI SO. * IDE de Arduino. * Scripts en Python. * Motor de base de datos: MySQL. * Uso editor Atom. * Plantillas HTML. * VNC. * Navegador web.	Indonesia	SCADA para monitorear ycontrolar el proceso de filtración. Automatización del filtrado y regulación de niveles de pH. Tiene impacto en un sector de infraestructura crítica con posibilidad de ser escalable.

Fuente: Elaboración propia (2026).

Vulnerabilidades identificadas en los sistemas estudiados

Si bien es cierto que el enfoque *Open Source* presenta potencialidades a nivel de desarrollo e innovación, también puede presentar limitaciones de diversa índole. Fundamentalmente,

en los sistemas analizados se han determinado vulnerabilidades asociadas tanto a niveles de seguridad, condiciones de operación y la dependencia de ciertos tipos de dispositivos de carácter privativo.

En el caso de PDVSA SCADA GALBA, el hardware es propietario, lo que mantiene una dependencia de proveedores externos, se incurre en costos elevados y la plataforma se encuentra supeditada a hardware privativo, lo cual deriva en una dependencia de corporaciones foráneas que inciden de manera directa en términos de soberanía; en cuanto al tema de seguridad, SCADA GALBA ha sido objeto de ciberataques e intentos de intrusión, por tanto amerita de manera obligatoria un mayor blindaje de la plataforma en términos de ciberseguridad, con algoritmos potentes que puedan repeler cualquier acceso no autorizado y, por ende, mal intencionado que constituye una seria amenaza a la industria más importante del país.

Por otra parte, en el control de un sistema fotovoltaico en Canadá, el uso de Arduino Mega 2560 y *Raspberry Pi* reduce costos, pero no se ha comprobado su desempeño ni su robustez para entornos severos; además, en la plataforma *EmonCMS* se desconoce si aplica un cifrado potente, segmentación de red u otras técnicas de ciberseguridad, lo cual implica estar expuesta a ataques *web*, inyección SQL u otros ciberataques.

Finalmente, en el sistema de potabilización de agua en Indonesia, si bien es cierto que su hardware es de bajo costo, la *Raspberry Pi* actúa como MTU y única unidad central, siendo un fallo el hecho de que no haya redundancia por cuanto al sistema de control general; por otra parte, la dependencia de un solo sensor de pH y de relés/bombas hace vulnerable el sistema ante la detección de fallas; en cuanto al software, el acceso remoto vía *web* y VNC, sin medidas de seguridad explícitas, expone a la plataforma a intrusiones.

Reflexiones finales

Las tecnologías *Open Source* definitivamente tienen una amplia implementación en los SCI. La reducción de costos es un factor evidente: un ejemplo de ello es el caso del sistema de generación fotovoltaica, el cual logró una reducción de costos operativos al prescindir de hardware propietario, instalando *Arduino*, *Raspberry Pi* y *OpenPLC*, manteniendo el óptimo desempeño del sistema. Otra ventaja de las tecnologías abiertas es la flexibilidad, la cual permite adaptar soluciones a necesidades específicas. Adicionalmente, el acceso al código fuente facilita la detección de vulnerabilidades, el mantenimiento y posible escalabilidad. El desarrollo colaborativo, sostenido por comunidades a nivel mundial, acelera los avances y garantiza la innovación. Por cuanto al tema de la soberanía tecnológica, una manera de encaminarse a la misma es el rompimiento, en la medida de lo posible, de la dependencia de proveedores foráneos, permitiendo a las instituciones estatales, de la mano con iniciativas privadas y mixtas, tomar decisiones a nivel estratégico en cuanto a implementaciones, migraciones de tecnologías y mantenimiento de las mismas.

En otro orden de ideas, la aplicación de soluciones *Open Source* en los SCI ha reafirmado

la integración cada vez más estrecha de las TIC con las TO, teniendo como eje principal la transformación digital en la industria. Esta convergencia puede dar lugar, en un futuro cercano, a la incorporación de tecnologías de la información disruptivas en los ámbitos industriales. El análisis de los casos estudiados demuestra que la integración TIC/TO es factible con tecnologías abiertas, aún cuando deban reforzarse en el campo de la ciberseguridad de una manera profunda, debido a los altos niveles de conectividad.

Venezuela enfrenta el desafío de aplicar tecnologías abiertas en la mayor parte de su infraestructura crítica —petróleo, energía eléctrica, agua, salud, agricultura— en un contexto de restricciones, sanciones y bloqueos externos. Las tecnologías *Open Source*, sin lugar a dudas, constituyen la vía estratégica para avanzar hacia la soberanía tecnológica, aún cuando ésta pudiera verse como un objetivo utópico. Una de las propuestas consiste en adoptar soluciones de hardware abierto y software libre en toda la infraestructura crítica del país, con migración progresiva y continua hasta lograr prescindir, en la mayor medida posible, de licencias propietarias; todo ello se logra a través de una capacitación oportuna y programas educativos en todos los niveles. Finalmente, se propone un ecosistema nacional de tecnologías abiertas para todos los ámbitos de la vida nacional, que articule universidades, entes privados, centros de investigación, industria y el Estado venezolano. Sectores críticos como la industria petrolera, el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), hidrológicas, salud, producción agropecuaria, entre otros, deberán adoptar el enfoque abierto de manera definitiva para lograr el objetivo de soberanía tecnológica.

Referencias

Ahsan, L., Baig, M., y Iqbal, M. (2022). Low-Cost, Open-Source, Emoncms-Based SCADA System for a Large Grid-Connected PV System. *Sensors*, *22*(18), 6733. https://doi.org/10.3390/s22186733

Antunez, Y., y Valle, Y. (2015). *Plataforma de notificación de alarmas para sistemas SCADA a través de tecnologías de comunicaciones móviles* [Tesis de maestría, Universidad de las Ciencias Informáticas].

Arduino. (2026a). About Arduino. https://www.arduino.cc/en/about/

Arduino. (2026b). Arduino Opta. https://www.arduino.cc/pro/hardware-arduino-opta/

Arduino. (2026c). Arduino Portenta Machine Control. https://docs.arduino.cc/hardware/portenta-machine-control/

Bigelow, S., y Lutkevich, B. (2024). ¿Qué es la convergencia TI/TO? Todo lo que necesita saber. https://www.computerweekly.com/es/definicion/Que-es-la-convergencia-TI-TO-Todo-lo-que-necesita-saber

Cossio, O. (2020). *Vulnerabilidades de ciberseguridad en sistemas de control industrial y accesibilidad a través de redes públicas* [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Nordeste, Argentina]. https://repositorio.unne.edu.ar/server/api/core/bitstreams/6ac2e6ae-414c-4a2d-a452-00d23ea2193d/content

Devboards. (2025). Arduino Mega 2560 Rev3 Pinout. https://devboards.info/boards/arduino-mega2560-rev3

DIN SPEC 3105. (2020). *Open Source Hardware - Teil 1: Anforderungen an die technische Dokumentation* (Norma técnica). Deutsches Institut für Normung. https://www.researchgate.net/publication/342564027_DIN_SPEC_3105-1_Open_Source_Hardware

EdaTech. (2026). ED-IPC3100 Series. https://edatec.cn/ipc/IPC3100

Emoncms. (2026). Emoncms Architecture. https://github.com/emoncms/emoncms/blob/master/docs/design/architecture.md

Free Software Foundation. (2026). What is Free Software. https://www.fsf.org/about/what-is-free-software

IBM. (2026). ¿Qué es open source? https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/open-source

Industrial Shields. (2024). RASPBERRY PLC 38R. https://www.industrialshields.com/es_ES/shop/raspberry-plc-38r-2377

Larasati, S., Zaki, E., y Ridlo, M. (2021). Design and Implementation Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) of Filtration Process of Water Treatment Plant (WTP) by Using Raspberry PI. *Proceedings of the 1st International Conference on Islam, Science and Technology, ICONISTECH 2019, 11-12 July 2019, Bandung, Indonesia*. https://doi.org/10.4108/eai.11-7-2019.2297520

March, C., y Schieferdecker, I. (2021). *Technological Sovereignty as Ability, Not Autarky* (inf. téc. N.º 9139). Center for Economic Studies y Ifo Institute (CESifo). https://www.econstor.eu/handle/10419/236681

Mikrodev. (2025). What Is RTU Device? https://www.mikrodev.com/what-is-rtu-device/

Nankya, M., Chataut, R., y Akl, R. (2023). Securing Industrial Control Systems: Components, Cyber Threats, and Machine Learning-Driven Defense Strategies. *Sensors*, *23*(21), 8840. https://doi.org/10.3390/s23218840

Nasby, G. (2019). Introduction to ISA112 SCADA Systems Standard [ISA112 committee co-chair presentation]. https://www.grahamnasby.com/files_publications/NasbyG_2019_Intro-to-ISA112_Halton-SCADA-Workshop_jun26-2019_slides.pdf

Open Source Hardware Association. (2024). Definición 1.0. https://oshwa.org/resources/open-source-hardware-definition/

Open Source Initiative. (2024). The Open Source Definition. https://opensource.org/osd

OpenPLC_v3. (2026). OpenPLC Runtime version 3. https://github.com/thiagoralves/OpenPLC_v3

Raspberry PI OS. (2026). Raspberry PI OS. https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/os.html

Red Hat. (2026). What is open hardware? https://opensource.com/resources/what-open-hardware

Ronceros, C., Assi, J., Martínez, Y., Medina, J., y León, P. (2022). Sistema de Respuesta de Voz Interactiva (IVR) para la notificación de datos operacionales de la Planta Boquerón de la División Furrial - PDVSA. *Revista Tecnológica - Espol*, *34*(3), 100-117. https://doi.org/10.37815/rte.v34n3.954

Siemens PLC Guides. (2025). Home. https://www.siemensguides.com/Hardware

Sulbarán, P. (2025). Ciberseguridad aplicada a los sistemas de control industrial: Caracterización, vulnerabilidades, estrategias y expectativas. En *Ciberseguridad en la era de la convergencia tecnológica*. https://convite.cenditel.gob.ve/files/2026/01/Libro2025.pdf

Tecnologías Libres en el sector salud y alta complejidad



Desarrollo de un sistema de planificación de tratamiento en radioterapia externa: Principios conceptuales y una ruta hacia las Tecnologías Libres

Jesús Erazo[1]

Introducción

En física, el sonido se describe básicamente a partir de las magnitudes frecuencia y amplitud. En este sentido, no se utiliza el concepto de fuerza en su descripción. Por tanto, caracterizar un sonido como fuerte o suave no es valido físicamente. Sin embargo, existen palabras cuya pronunciación se percibe como un sonido tan fuerte en el oído y en el alma humana: "cáncer". Aunque, esta patología de origen multifactorial, estocástica y con capacidad invasiva, en la presente década, no es la primera causa de muerte a nivel global de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (2023), es importante destacar que sí se encuentra ocupando el sexto lugar dentro de las enfermedades que más originan morbilidad y mortalidad.

Ahora bien, el tratamiento de cualquier neoplasia maligna es multimodal. Por lo general, para reducir el tamaño del tumor, se hace uso de un terapia neoadyuvante o adyuvante como quimioterapia, inmunoterapia, hormonoterapia o radioterapia, previo a la cirugía o extirpación. El tipo de tratamiento indicado por el oncólogo, depende del tipo de cáncer, tamaño, ubicación, estadio y condiciones físicas del paciente.

De acuerdo con el Organismo Internacional de Energía Atómica (2019), la radioterapia, es la modalidad más utilizada como tratamiento neoadyuvante y coadyuvante en el tratamiento del cáncer. Es decir, en algún momento dado, un paciente oncológico se someterá a esta técnica terapéutica.

En términos generales, la radioterapia consiste en el uso de la radiación ionizante tanto directa a través de irradiación del tumor con electrones o protones. La radiación ionizante indirecta, utiliza fotones de rayos X o rayos gamma que son dirigidos a la neoplasia maligna. El uso de fotones o partículas cargadas en radioncología, depende de la ubicación, extensión o profundidad del tumor, así como la afectación de los órganos a riesgo o tejidos sanos. De cualquier modo, el objetivo principal de la radioterapia es el daño al material genético de la neoplasia maligna. Es necesario mencionar que, en la actualidad, los principales equipos utilizados en tratamiento radioterapéutico son los aceleradores lineales clínicos (LINAC) y la unidad de terapia de protones.

[1]Licenciado en Física y Magíster en Física Fundamental, egresado de la Universidad de Los Andes. Actualmente se desempeña como docente en la ULA y como investigador en el Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL). Autor y editor de publicaciones académicas y de divulgación científica. jerazo@cenditel.gob.ve

Por otro lado, un paciente que se va a someter a un proceso de radiación ionizante debe seguir una serie de pasos. En primer lugar, a partir de estudios de biopsia y de imagenología médica (resonancia magnética y/o tomografía computarizada), el oncólogo tratante prescribe el tipo de tratamiento de radiación: estándar, hiperfraccionamiento e hipofraccionamiento, dosis diaria y número de secciones. En segundo lugar, el paciente debe ser valorado por un radioncólogo. Además, realizarse una tomografía computarizada (CT, por sus siglas en inglés) que servirá para su posicionamiento en el equipo de radioterapia. Culminada esta etapa con el paciente, a partir de la CT, el radioncólogo delimita las regiones de interés (ROI) y los órganos a riesgos (OAR). Con base a lo anterior, el físico médico diseña el plan de tratamiento: i) puntos de interés (POI) o de referencia, ii) geometría del campo de radiación: tamaño, orientación, número y ponderación, iii) validación del plan a partir del Histograma Dosis – Volumen (DVH). Una vez diseñado y aprobado el plan de tratamiento por el radioncólogo, el paciente se somete a un proceso conocido como simulación de radiación, el cual consiste en fijar la posición que tendrá en el LINAC durante el tratamiento, cumplido este paso, se inicia las secciones de irradiación indicadas.

En particular, la planificación es la etapa más crítica del tratamiento de radioterapia, debido a los efectos estocásticos de la radiación ionizante. Por tanto, una planificación incorrecta puede causar daños indeseables a los tejidos sanos. En ese sentido, la principal y fundamental herramienta con que cuenta un radioncólogo y el físico médico es el *software* del Sistema de Planificación de Tratamiento (TPS por sus siglas en inglés). Esta herramienta es vital para el diseño y validación del tratamiento en radioterapia. En efecto, un acelerador lineal sin un TPS queda tecnológicamente obsoleto o incluso inoperativo para implementar técnicas de alta complejidad como: Radioterapia de Intensidad Modulada (IMRT), Arcoterapia Volumétrica Modulada (VMAT) o Radioterapia corporal estereotáctica (SBRT).

Como se mencionó anteriormente, el uso de radiación ionizante mediante el uso de un LINAC es esencial para un tratamiento eficaz del cáncer. Sin embargo, el acceso está limitado por los altísimos costos de las licencias del Sistema de Planificación de Tratamiento. Por ejemplo, el costo de la licencia de uso de un TPS (*Therapy Treatment Planning*) de la empresa en tecnología oncológica Varian, varía en un rango entre 10 mil a 100 mil dólares (Zaparolli, 2019).

Dentro de este mismo contexto, de acuerdo con Sarria et al. (2022), la inversión necesaria para cerrar la brecha en radioterapia en América Latina, estimada en un requerimiento total de $872 millones de dólares para el año 2030, está más allá de la simple adquisición de infraestructura física. Según el análisis presentado en dicho estudio, la sostenibilidad de los servicios oncológicos está intrínsecamente ligada al mantenimiento y a las licencias de uso de los sistemas de planificación de tratamiento (TPS). Por tanto, implementar la tecnología de radioterapia en los sistemas de salud pública es costosa por los altísimos costos de las licencias de *software* privativo.

En tal sentido, para democratizar el acceso a herramientas de planificación de tratamiento

sin el costo de los sistemas comerciales y cerrados (cajas negras), se hace necesario el uso de Tecnologías Libres. Por un lado, un sistema de planificación de código abierto permite adaptar el *software* a las necesidades específicas de los centros de salud, así como reducir la dependencia de proveedores externos y favorecer la soberanía tecnológica. Por otro lado, permite la formación de físicos médicos en dosimetría y planificación de tratamiento. Además, facilita que universidades y centros de investigación auditen los algoritmos de cálculo de dosis y optimización.

Por lo tanto, el presente ensayo o escrito tiene como objetivo analizar el potencial de las tecnologías libres como una alternativa viable a los sistemas de planificación de tratamiento (TPS) privativos, con el fin de democratizar el acceso a la radioterapia.

Definición, sintomatología, etimología, etiología y epidemiología del cáncer

La World Health Organization (2026) define al cáncer como un término genérico para un grupo extenso de patologías multifactoriales y estocásticas. Se caracteriza por el crecimiento acelerado de células anómalas con la capacidad de invadir tejidos circundantes o diseminarse a otros órganos (metástasis).

De acuerdo con la American Cancer Society (2024), los mecanismos de alerta de la presencia de una lesión o patología pueden ser a través de signos (fiebre o una hemorragia; observable o medible por una persona externa) y síntomas (dolor o agotamiento; experiencia subjetiva percibida exclusivamente por el paciente). Asimismo, la presentación clínica del cáncer está intrínsecamente ligada a la localización del tumor, su volumen y el efecto que este ejerce sobre los tejidos circundantes, destacando además que, en estadios de metástasis, las manifestaciones pueden emerger en regiones anatómicas distintas a la del tumor primario.

En cuanto a la etimología de la palabra cáncer, tiene sus raíces en el siglo IV a.C., en los textos médicos de la antigua Grecia conocidos como *Corpus Hippocraticum*. En los *Tratados hipocráticos IV* se describen lesiones ulcerosas de crecimiento progresivo e incontrolado que, al expandirse por los tejidos, asemejan las extremidades de un cangrejo, razón por la cual se les denominó con el vocablo griego *karkínos* (Hipócrates, 1988)[2]. Esta analogía visual, basada en la similitud entre las venas inflamadas que rodean un tumor y las patas de un cangrejo, fue afianzada posteriormente por Galeno y permitió que el término transitara del griego al latín como *cancer*, diferenciándose finalmente en el castellano entre el crustáceo (cangrejo) y la patología (Salaverry, 2013).

Por otro lado, la etiología del cáncer, de acuerdo con Fidler-Benaoudia y Bray (2020), está influenciada por una compleja interacción de elementos cancerígenos como el consumo de tabaco y alcohol, la dieta, infecciones, las radiaciones ionizantes, la radiación solar y la contaminación ambiental. No obstante, los autores, al comparar las

[2]Hipócrates escribió originalmente sus tratados aproximadamente entre los siglos V y IV a. C., la traducción de términos médicos como cáncer proviene de la interpretación académica de Sanz Mingote.

estadísticas de la enfermedad con el Índice de Desarrollo Humano (IDH), encuentran una transición epidemiológica interesante. Por ejemplo, en relación con la obesidad, destacan que el sobrepeso y la obesidad son factores causales críticos para múltiples patologías: adenocarcinoma de esófago, cáncer colorrectal, de riñón y de mama en la posmenopausia, entre otros. Según su análisis, el impacto del exceso de grasa corporal es significativamente mayor en países con un IDH alto a muy alto, donde las fracciones atribuibles de cáncer duplican o triplican a las de naciones con IDH bajo.

Por otro lado, Fidler-Benaoudia y Bray (2020), con referencia a las infecciones, encuentran que a menor IDH, mayor es el número de cánceres causados por agentes infecciosos. En países con IDH muy alto, solo el 8 % de los casos se atribuyen a infecciones (fundamentalmente de la bacteria *Helicobacter pylori*), mientras que en países con IDH bajo la cifra asciende al 25 % (con un papel predominante del virus del papiloma humano, VPH). Los autores enfatizan que es imperativo establecer estrategias de control de peso e implementar programas de vacunación.

En lo referente a la epidemiología, de acuerdo con un artículo publicado por Sung et al. (2021), en el año 2020 las estadísticas del cáncer a nivel mundial muestran 19,3 millones de nuevos casos y casi 10 millones de muertes para ese año. En particular, el cáncer de mama en mujeres desplazó al de pulmón como la neoplasia más frecuentemente diagnosticada, representando el 11,7 % de los casos. Sin embargo, los tumores malignos de pulmón se mantienen como la causa principal de mortalidad, siendo responsables del 18 % de los fallecimientos. Otro hecho que revela el informe de investigación es que el riesgo de morir por cáncer cervicouterino está por encima del cien por ciento en países en vías de desarrollo cuando se compara con los desarrollados. Las proyecciones a nivel mundial del informe para el año 2040 indican que la patología ascenderá a 28,4 millones de casos, lo que representa un incremento del 47 % respecto a 2020. En particular, para los países en desarrollo se proyecta un incremento de entre el 64 % y el 95 %, debido a cambios demográficos y la intensificación de factores sanitarios, climáticos y financieros. En tal sentido, se hace necesaria la prevención y la atención oncológica para mitigar el impacto del cáncer.

En el caso de Venezuela, de acuerdo con un informe de la International Agency for Research on Cancer (2024), en el año 2022 se registraron 62 947 nuevos casos de cáncer y 31 737 muertes. Además, con una población de aproximadamente 29,2 millones de personas, el riesgo de desarrollar cáncer antes de los 75 años se sitúa en un 18,3 %. Ahora bien, los tipos de cáncer más frecuentes son: mama (8 301, 13,2 %), próstata (8 212, 13,0 %), colorrectal (6 384, 10,1 %), pulmón (5 474, 8,7 %) y cuello uterino (3 965, 6,3 %). En los hombres, el adenocarcinoma prostático es uno de los principales, con un 26,2 % de los nuevos diagnósticos. Por otro lado, en las mujeres, el cáncer mamario predomina con un 26,3 %, seguido por el de cuello uterino con un 12,6 % (segunda causa de muerte para las mujeres). El informe también señala que las causas principales de fallecimientos por enfermedades oncológicas en la población general son: cáncer de pulmón (4 617, 14,5 % del total de decesos; segunda causa de muerte para los hombres), cáncer de próstata (3 781) y cáncer de mama (2 953). En cuanto a las proyecciones a futuro, la prevalencia de la patología a los cinco años en

Venezuela se estima en 155 323 casos.

Tratamiento del cáncer

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (2023), el tratamiento de la patología es multimodal. Con base en la naturaleza del tumor y en las características de cada paciente, se aplica una o la combinación de las siguientes modalidades: intervenciones quirúrgicas para la remoción tumoral, quimioterapia, tratamientos hormonales, tratamientos biológicos dirigidos y radioterapia mediante radiaciones ionizantes. Cada variante de cáncer exige protocolos específicos y el éxito del tratamiento depende de la precisión diagnóstica inicial. El objetivo del tratamiento es la curación y la mejora de la calidad de vida del paciente o, en su defecto, proporcionar cuidados paliativos en fases terminales para proporcionar bienestar físico, psicosocial y espiritual. La Organización Mundial de la Salud (2023) señala que si se detectan tempranamente y se tratan bajo prácticas óptimas, ciertas patologías —como el cáncer de mama, de cuello uterino, colorrectal, o incluso el seminoma y algunos linfomas en niños— tienen altas tasas de curación.

Radioterapia

La radioterapia, de acuerdo con la International Atomic Energy Agency (2023), es un tratamiento oncológico que emplea radiación ionizante: rayos X, rayos gamma, electrones de alta energía o partículas pesadas. A nivel químico y biológico, actúa dañando directamente el ADN de las células tumorales, inhibiendo su división, lo cual produce la reducción del tumor y, en el mejor de los casos, su eliminación total. Existen dos modalidades para administrar radiación en el tratamiento del cáncer: la radioterapia de haz externo (teleterapia) y la radiación interna (braquiterapia). Ahora bien, para garantizar la eficacia del tratamiento y la protección de los tejidos sanos circundantes, el organismo destaca la necesidad de un equipo multidisciplinario compuesto por radiooncólogos, físicos médicos y técnicos en radioterapia.

La radioterapia de haz externo consiste en dirigir rayos de alta energía como fotones, protones o partículas cargadas hacia la ubicación del tumor desde una fuente situada a cierta distancia del cuerpo, utilizando para ello unidades de cobalto o aceleradores lineales (Baskar et al., 2012; International Atomic Energy Agency, 2023). En esta modalidad, el tamaño y la forma del haz de radiación se ajustan en lo posible para concentrar la dosis en el tumor y así preservar los tejidos sanos circundantes mientras la máquina se desplaza angularmente alrededor del paciente.

Ahora bien, el tratamiento de braquiterapia implica la colocación de fuentes radiactivas (isótopos de cesio, iridio, cobalto o yodo-125) encapsuladas, como semillas o catéteres, directamente dentro del sitio del tumor o en contacto con él. Esta modalidad, debido a su corto alcance, tiene la ventaja de entregar dosis elevadas de forma muy localizada con un impacto mínimo en los órganos a riesgo adyacentes, resultando especialmente útil en tumores ginecológicos y de próstata (Baskar et al., 2012; International Atomic Energy Agency, 2023).

Dependiendo de la necesidad clínica, las fuentes se aplican de manera temporal mediante dispositivos especiales durante minutos o días, o bien de forma permanente mediante implantes del tamaño de un grano de arroz que pierden su radiactividad gradualmente con el tiempo (International Atomic Energy Agency, 2023).

La física de las radiaciones ionizantes

La comprensión de la física de la radiación ionizante es fundamental para analizar e interpretar sus efectos biológicos en los tejidos y su utilidad clínica para el tratamiento radioterapéutico.

Ahora bien, la radiación es un fenómeno físico relacionado con la emisión, propagación y transferencia de energía, ya sea como ondas electromagnéticas o mediante partículas (cargadas o neutras). Físicamente, la radiación se desplaza en línea recta hasta que interactúa con la materia, donde puede ocurrir su atenuación a través de procesos de absorción y dispersión.

La radiación ionizante se clasifica en dos categorías principales: indirecta y directamente ionizante. La indirectamente ionizante se compone de partículas neutras como fotones y neutrones. Los fotones ionizantes resultan de diversos procesos: transiciones electrónicas (rayos X), interacciones de Coulomb entre electrón y núcleo (*Bremsstrahlung*), transiciones nucleares (rayos gamma) o aniquilación positrón-electrón. Por otro lado, la radiación directamente ionizante consta de partículas cargadas como: electrones, protones, partículas alfa e iones pesados.

De acuerdo con la descripción cuántica, la radiación electromagnética se conceptualiza a través de fotones que interactúan de forma discreta con la materia. La energía transportada por esta radiación es proporcional a su frecuencia ($E = h\nu$). Ahora bien, desde una perspectiva de daño celular, los fotones de alta frecuencia, por ejemplo, los rayos X y gamma, se clasifican como indirectamente ionizantes (los fotones necesitan un intermediario para causar la lesión celular). Esto se debe a que poseen energía suficiente para penetrar el tejido humano, vencer la energía de enlace —la fuerza de atracción electrostática entre el núcleo y el electrón— y arrancar electrones de las capas orbitales (K o L) de los átomos que conforman las células. Físicamente, al interactuar con los tejidos, estos fotones liberan electrones secundarios a través del efecto fotoeléctrico o Compton; estos electrones, a su vez, producen ionizaciones adicionales y masivas. Finalmente, este proceso de ionización es decisivo, ya que genera radicales libres y alteraciones estructurales en la cadena del ADN, desencadenando los efectos biológicos observados en el tejido vivo.

Por otro lado, a diferencia de los fotones de rayos X y gamma, la radiación corpuscular —compuesta por partículas con masa y carga eléctrica como protones, partículas alfa, beta (electrones o positrones) e iones pesados— se clasifica como directamente ionizante (las partículas cargadas tienen la propiedad de interactuar mediante fuerzas de atracción o repulsión electrostática de manera continua). Estas partículas, provenientes tanto de la

desintegración de radioisótopos como de dispositivos conocidos como aceleradores lineales, poseen una carga eléctrica que les permite interactuar continuamente con los electrones de los átomos del medio a través de fuerzas de tipo Coulomb. En este proceso, transfieren su energía cinética de forma directa para producir ionizaciones y excitaciones a lo largo de su trayectoria. Físicamente, debido a esta alta tasa de interacción y su masa característica, su capacidad de penetración en la materia es significativamente menor comparada con la de los fotones.

No obstante, los neutrones son un caso particular dentro de la radiación corpuscular. A diferencia de los protones o partículas alfa e iones masivos, los neutrones son partículas masivas y eléctricamente neutras (su comportamiento se asemeja más al de los fotones de rayos X y gamma, en términos de penetración e ionización indirecta). Consecuentemente, los neutrones no interactúan mediante fuerzas electrostáticas con la capa electrónica de los átomos. Por tanto, es previsible que se desplacen en línea recta grandes distancias dentro de la materia hasta colisionar directamente con los núcleos atómicos del medio. A través de colisiones elásticas o capturas neutrónicas, transfieren su energía a partículas cargadas secundarias (protones de retroceso o fragmentos nucleares), las cuales son finalmente las responsables de producir la ionización y el daño biológico en el tejido.

Además, la descripción física de la radiación se complementa al estudiar el transporte de partículas en un medio material, de interés particular, un tejido u órgano. En este sentido, la distinción entre partículas cargadas y neutras es fundamental para el modelado matemático de su alcance y atenuación.

En términos generales, el estudio del transporte de partículas en un medio material debe fundamentarse en la teoría de la probabilidad y estadística. En el caso de fotones, se observa experimentalmente que, al incidir un haz sobre un bloque de plomo, algunas partículas depositan su energía en él mientras que otras atraviesan el material sin interactuar. De tal manera, la interacción no se basa en principios deterministas, sino que está gobernada por la probabilidad de que el fotón encuentre un centro de interacción (núcleo o electrón). Esta interacción puede ocurrir al azar tanto en la superficie como en cualquier punto a cierta profundidad, lo que define el carácter aleatorio del transporte. Física y matemáticamente, esta probabilidad está cuantificada por la sección transversal (σ). En este sentido, solo se puede predecir el libre camino medio (λ) de un fotón, el cual representa una esperanza matemática y no una certeza individual.

Por otro lado, mientras que la mecánica clásica exige el conocimiento simultáneo de la posición y el momento lineal para describir una colisión, el caso de los electrones requiere un enfoque distinto debido a la dualidad onda-partícula. De acuerdo con la mecánica cuántica y el principio de incertidumbre, la posición y la cantidad de movimiento de las partículas incidentes y de los electrones orbitales no están definidas simultáneamente. En consecuencia, el modelo clásico de impacto de partículas puntuales resulta insuficiente. La descripción de estas colisiones debe abordarse mediante la ecuación de Schrödinger y densidades de probabilidad junto con la teoría de la dispersión (*scattering*), para calcular la probabilidad

de que un electrón modifique su trayectoria o su estado energético. Por lo tanto, el ángulo de dispersión (θ) y la transferencia de energía (ΔE) en cada evento son variables aleatorias extraídas de distribuciones de probabilidad.

Sin embargo, aunque el transporte de la radiación es un proceso de Bernoulli caracterizado por miles de eventos independientes, la evidencia experimental muestra que el comportamiento del haz (un flujo de $\sim 10^{10}$ partículas) converge hacia curvas promedio predecibles, como la atenuación exponencial o el pico de Bragg. Asimismo, el modelado del transporte debe considerar que cada interacción primaria desencadena una cascada de eventos secundarios —como electrones Auger o radiación de frenado— que contribuyen a la deposición final de energía. En tal sentido, en la dosimetría clínica se justifica el uso de la estadística porque el interés reside en la fluctuación de la energía depositada en un volumen determinado.

En resumen, el transporte de partículas en la materia resulta en un proceso intrínsecamente estocástico y estadístico. Predecir la trayectoria individual de una partícula es prácticamente imposible; solo es factible describir el comportamiento promedio de un flujo masivo. La distinción entre partículas cargadas y neutras es fundamental para el modelado matemático: para los fotones se calcula la probabilidad de ocurrencia de la interacción, mientras que para los electrones se determina la probabilidad de cambio de estado. En el campo de la dosimetría, predecir con exactitud la distribución de la dosis absorbida es un proceso complejo que requiere, necesariamente, un enfoque probabilístico y estadístico apoyado en el formalismo de las secciones eficaces.

Mecanismos de interacción de la radiación ionizante con la materia

Interacciones de fotones con la materia

Las interacciones de los fotones con la materia son procesos estocásticos que dependen de la energía $h\nu$ del fotón y del número atómico Z del medio atenuador. Los fotones pueden experimentar los siguientes procesos: i) interacción con un electrón orbital cuya energía de enlace E_B es del orden de la energía del fotón ($h\nu \geq E_B$), dando lugar al efecto fotoeléctrico o dispersión coherente; ii) interacción con un electrón orbital con una energía de enlace mucho menor que la energía del fotón ($E_B \ll h\nu$), resultando en el efecto Compton o producción de tripletes; y iii) interacción con el campo del núcleo, originando la producción del par electrón-positrón. Durante estos eventos, el efecto sobre el fotón puede ser absorbido (efecto fotoeléctrico, producción de pares/tripletes) o dispersado de manera coherente (Rayleigh o Thomson) o incoherente (efecto Compton). Cada mecanismo tiene una probabilidad de ocurrencia asociada a una sección eficaz o transversal específica: τ para el efecto fotoeléctrico, σ_{coh} para la dispersión coherente, σ_{incoh} para la dispersión incoherente y κ para la producción de pares y tripletes. Como se observa en la 1, a energías superiores al ultravioleta, los procesos dominantes son el fotoeléctrico (energías bajas), Compton (energías intermedias) y producción de pares (energías altas).

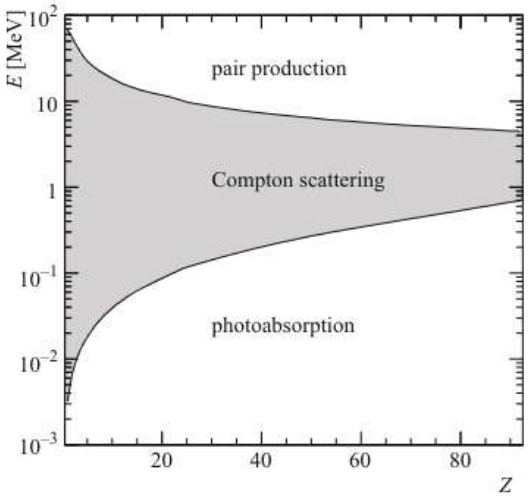


Figura 1: Energía del fotón en función del número atómico.
Fuente: Bichsel y Schindler (2020).

El efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico es un fenómeno descrito por la mecánica cuántica en el cual un fotón interactúa con un electrón orbital fuertemente ligado. Este proceso se caracteriza porque su probabilidad de ocurrencia aumenta cuando la energía del fotón ($E = h\nu$) es igual o ligeramente superior a la energía de enlace del electrón (E_B) en su capa específica ($h\nu \geq E_B$).

Ahora bien, como resultado de la interacción, el fotón es absorbido completamente, desapareciendo al interactuar con el átomo. Este último queda en un estado excitado y libera el exceso de energía mediante la expulsión del electrón orbital, denominado fotoelectrón. Bajo la premisa de que la energía transferida al núcleo en retroceso es despreciable para fines prácticos, la energía cinética, E_K, con la que el fotoelectrón abandona el átomo se define como:

$$E_K = h\nu - E_B \tag{1}$$

Por otro lado, tras la expulsión del fotoelectrón, se genera una vacante en la estructura de capas atómicas que es ocupada por un electrón de una capa superior. La diferencia de energía resultante se manifiesta a través de efectos secundarios, tales como la emisión de rayos X característicos (fluorescencia) o electrones Auger. Este proceso continúa en una cascada de eventos que puede dejar al átomo altamente ionizado.

A energías bajas (rayos X suaves), donde la longitud de onda de la radiación es mucho mayor que el radio atómico, la interacción se modela mediante el acoplamiento dipolar eléctrico. Bajo esta premisa, el átomo experimenta un campo eléctrico espacialmente uniforme, permitiendo describir la respuesta del material (sea conductor, aislante o dieléctrico) como una transición cuántica entre el estado fundamental $|0\rangle$ y un estado

excitado $|n\rangle$, ya sea discreto o en el continuo. Estas transiciones están regidas por reglas de selección derivadas de la conservación del momento angular y la paridad. Así, la sección eficaz fotoeléctrica representa la suma de las probabilidades de todas las transiciones dipolares permitidas por encima del umbral de ionización (Bichsel y Schindler, 2020).

En tal sentido, la probabilidad de ocurrencia de esta interacción se rige por leyes probabilísticas de la mecánica cuántica y requiere el uso de la función de onda de la nube electrónica, lo que implica cálculos de alta complejidad. En el rango de diagnóstico (típicamente entre 10 keV y 150 keV), la sección eficaz atómica, ${}_a\tau$, se rige por la relación de proporcionalidad (Cunningham y Dance, 2014):

$$ {}_a\tau \propto \frac{Z^4}{(h\nu)^3} \tag{2}$$

Por tanto, la probabilidad de ocurrencia del efecto fotoeléctrico es extremadamente sensible al material y al aumento de la energía del fotón en el rango de diagnóstico. Es necesario destacar que esta aproximación es válida estrictamente en el régimen no relativista ($E \ll m_e c^2 \approx 511$ keV). A energías superiores, la longitud de onda del fotón se vuelve comparable al radio atómico, invalidando la simplificación dipolar y requiriendo el uso de la ecuación de Dirac completa para el cálculo de probabilidades. En tejidos blandos, al superar los 511 keV, el efecto Compton comienza a predominar sobre el fotoeléctrico, desplazando la relevancia práctica hacia la sección eficaz de Klein-Nishina. Por debajo de los 20 keV (en medios como el agua), coexisten el efecto fotoeléctrico y la dispersión de Rayleigh.

Para fines dosimétricos, la energía promedio transferida desde el fotón a los electrones, $\bar{E}_K^{\mathrm{tr,\ PE}}$, se calcula considerando el rendimiento fluorescente (Podgorsak, 2005):

$$\bar{E}_K^{\mathrm{tr,\ PE}} = h\nu - P_K \omega_K E_B^{(K)} \tag{3}$$

Donde $E_B^{(K)}$ es la energía de enlace de la capa K, P_K representa la fracción de interacciones que ocurren en la capa K (variando de $0,8$ en Z altos a $1,0$ en Z bajos) y ω_K es el rendimiento fluorescente para dicha capa.

El efecto Compton (Dispersión incoherente)

Fenomenológicamente, la dispersión de Compton es el resultado de la colisión incoherente entre un fotón de alta energía $h\nu$ (típicamente rayos X o gamma) y un electrón orbital (Ver Figura 2). El formalismo matemático de esta interacción integra la geometría, la probabilidad y la mecánica cuántica relativista, unificando la naturaleza ondulatoria clásica con la descripción cuántica de los fotones.

En la cinemática de la colisión, el fotón transfiere una fracción de su energía al electrón, desviándose de su trayectoria original en un ángulo θ con una energía residual $h\nu'$. El electrón es expulsado como una partícula de retroceso con una energía cinética T, alcanzando frecuentemente velocidades relativistas. Existe un vínculo determinista y unívoco entre la geometría de la dispersión y la transferencia de energía: para cada ángulo θ de desviación

del fotón, corresponde una energía cinética T específica, como consecuencia directa de las leyes de conservación del momento y la energía.

Es fundamental destacar que el electrón de retroceso posee un límite físico superior para la energía cinética que puede adquirir en una sola colisión. Este valor máximo, conocido como el Borde de Compton ($T_{\text{máx}}$), ocurre cuando el fotón experimenta una retrodispersión total ($\theta = 180°$), transfiriendo la mayor cantidad posible de momento al electrón:

$$T_{\text{máx}} = E\left(\frac{2\alpha}{1+2\alpha}\right) \tag{4}$$

Donde $\alpha = E/m_e c^2$. Ningún electrón de retroceso puede superar este umbral energético en una interacción Compton simple, lo cual se observa experimentalmente como una caída abrupta en los histogramas de energía de los detectores de radiación.

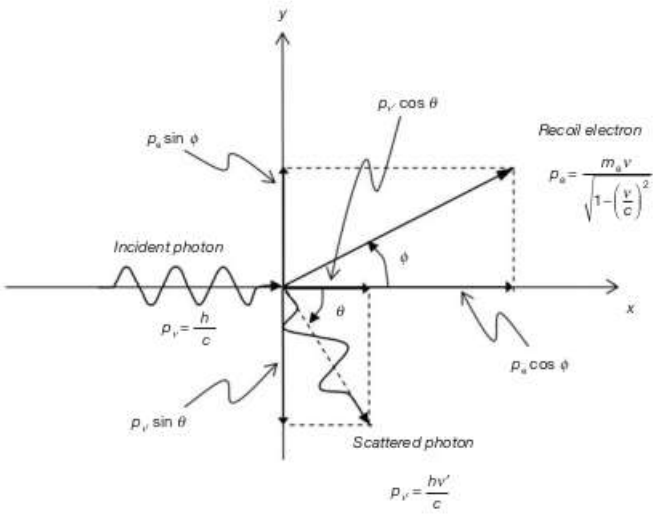


Figura 2: Diagrama esquemático de la dispersión Compton.
Fuente: Podgorsak (2005).

Estadísticamente, la probabilidad angular de este proceso se describe mediante la sección eficaz diferencial. Esta causalidad estocástica dicta la forma del espectro de energía de los electrones de retroceso; es decir, la probabilidad de que un fotón elija un ángulo determinado se traduce directamente en el depósito de energía observado en el medio.

Desde el punto de vista físico-matemático, cuando la energía del fotón es del orden de los keV o MeV —superando significativamente la energía de enlace E_B de los electrones de valencia—, es técnicamente válido asumir al electrón como una partícula libre e inicialmente en reposo.

Bajo esta premisa, la sección eficaz atómica ${}_a\sigma_C$ escala linealmente con el número atómico Z. No obstante, la sección eficaz por electrón ${}_e\sigma_C$ y el coeficiente de masa σ_C/ρ se

mantienen independientes de Z. Esta independencia es fundamental en física médica, pues la mayoría de los elementos biológicos presentan una relación $Z/A \approx 0{,}5$, resultando en una densidad electrónica casi constante ($\approx 3 \times 10^{23}$ e^-/g). Esto explica por qué, en el rango donde predomina el efecto Compton, la absorción en tejidos blandos es altamente predecible y depende casi exclusivamente de la densidad física del medio.

Una descripción rigurosa del proceso considera el espín del electrón y los efectos relativistas mediante las siguientes ecuaciones (Cunningham y Dance, 2014):

A continuación se presentan las relaciones cinemáticas y dinámicas fundamentales de la dispersión Compton[cite: 1]:

1. **Relación de Compton:**

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta) \tag{5}$$

2. **Energía del fotón dispersado:**

$$E' = \frac{E}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \tag{6}$$

3. **Energía cinética del electrón (Dosis):**

$$T = E\frac{\alpha(1 - \cos\theta)}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \tag{7}$$

4. **Sección eficaz diferencial de Klein-Nishina:**

$$\frac{\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{KN}}}{\mathrm{d}\Omega} = \frac{r_0^2}{2}\left(\frac{E'}{E}\right)^2\left(\frac{E}{E'} + \frac{E'}{E} - \sin^2\theta\right) \tag{8}$$

Asimismo, la sección eficaz diferencial también puede expresarse en función del factor f_{KN}[cite: 1]:

$$\frac{\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{KN}}}{\mathrm{d}\Omega} = \frac{r_0^2}{2}(1 + \cos^2\theta) f_{\mathrm{KN}} \tag{9}$$

Donde el término f_{KN} se define como[cite: 1]:

$$f_{\mathrm{KN}} = \left\{\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}\right\}^2\left\{1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{[1 + \alpha(1 - \cos\theta)][1 + \cos^2\theta]}\right\} \tag{10}$$

Dentro de este contexto, el espectro de energía del electrón se formula de la siguiente manera (Bichsel y Schindler, 2020)[cite: 1]:

$$\frac{\mathrm{d}\sigma^{(\mathrm{KN})}}{\mathrm{d}T} = \pi\left(\frac{\alpha hc}{m_e c^2}\right)^2\frac{1}{u^2 m_e c^2}\left(2 + \left(\frac{T}{E - T}\right)^2\left[\frac{1}{u^2} + \frac{E - T}{E} - \frac{2(E - T)}{uT}\right]\right) \tag{11}$$

Ahora bien, si la energía del fotón es grande en comparación con las energías de enlace atómico, la sección transversal para la dispersión Compton en un átomo escala aproximadamente con el número de electrones en el átomo:

$$\sigma_{\text{Compton}} \sim Z\,\sigma_{\text{KN}} \tag{12}$$

Por otro lado, en el ámbito de la radioterapia, donde el espectro de energías de los haces clínicos abarca desde los 6 MeV hasta los 24 MeV, el efecto Compton se establece como un proceso de interacción fundamental. No obstante, a medida que la energía aumenta hacia el extremo superior de este rango, otros fenómenos como la producción de pares comienzan a ganar un peso estadístico considerable en el campo de la dosimetría. Finalmente, para superar la simplificación clásica de electrón libre y en reposo, se deben incorporar los efectos de enlace atómico mediante la Función de Dispersión Incoherente $S(q, Z)$. Asimismo, el movimiento orbital intrínseco de los electrones ligados genera el Perfil Doppler, un ensanchamiento en la distribución de la energía transferida que rompe la relación unívoca estricta de la cinemática de Compton ideal, reflejando así la naturaleza dinámico-cuántica del átomo.

Dispersión coherente (Rayleigh)

La dispersión Rayleigh es un evento caracterizado por la colisión elástica de un fotón con los electrones ligados de un átomo. En este proceso, el fotón interactúa colectivamente con la nube electrónica completa; esto ocurre porque la proximidad entre los electrones es comparable a la longitud de onda de la radiación incidente. Debido a que la energía de retroceso transferida al núcleo es insignificante, el fotón no pierde energía sustancial, limitándose a cambiar su trayectoria a través de ángulos de dispersión muy pequeños (predominantemente hacia adelante).

Dado que el fotón dispersado conserva la energía del incidente y no se liberan electrones de retroceso, no existe transferencia de energía cinética a partículas cargadas ni depósito de dosis en el sitio de la interacción. Es fundamental precisar que, aunque la dispersión Rayleigh no contribuye al coeficiente de transferencia de energía, μ_{tr}, ni al de absorción de energía, μ_{en}, sí es un mecanismo que aporta al coeficiente de atenuación total, ya que el fotón es removido de la dirección del haz primario.

Al igual que otros mecanismos de interacción, la dispersión coherente depende del número atómico, Z, y de la energía del fotón, $h\nu$. La sección eficaz atómica, σ_R, es proporcional a $(Z/h\nu)^2$, mientras que el coeficiente de atenuación másico, σ_R/ρ, es proporcional a $Z/(h\nu)^2$. Por consiguiente, su probabilidad es significativamente mayor en materiales densos y de alto Z (como el plomo o medios de contraste) que en tejidos blandos (Podgorsak, 2005).

En el ámbito de la física médica, aunque contribuye muy poco a la degradación del contraste de la imagen por radiación dispersa, su impacto es menor comparado con el efecto Compton, de tal manera que su importancia en radiodiagnóstico es relativa. Del mismo modo, en radioterapia, donde se trabaja con energías de megavoltaje (MeV), la probabilidad de ocurrencia disminuye drásticamente, resultando prácticamente despreciable frente a los

efectos dominantes (Compton y producción de pares).

Desde una perspectiva cuántica, la dispersión por los distintos electrones ocurre en fase, lo que genera una distribución angular determinada por un patrón de interferencia característico del material. La sección eficaz diferencial resultante depende intrínsecamente del número atómico y del parámetro de transferencia de momento entre el fotón inicial y el dispersado, modelado a través del factor de forma atómico. La sección eficaz diferencial viene dada por (Cunningham y Dance, 2014):

$$\frac{\mathrm{d}\sigma_R}{\mathrm{d}\Omega} = \frac{r_0^2}{2}(1+\cos^2\theta)[F(x,Z)]^2 \tag{13}$$

$$\frac{\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{coh}}}{\mathrm{d}\Omega} = \frac{\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{Th}}}{\mathrm{d}\Omega}F^2(x,Z) \tag{14}$$

Donde $\mathrm{d}\sigma_{\mathrm{Th}}/\mathrm{d}\Omega$ es el coeficiente de dispersión diferencial de Thomson y la cantidad F se conoce como el factor de forma coherente (actúa como un factor de corrección sobre la dispersión clásica de Thomson para dar cuenta de la estructura del átomo)[cite: 2].

Interacciones de partículas cargadas con la materia

La radiación directamente ionizante se caracteriza por la interacción de partículas cargadas con los constituyentes atómicos del medio (electrones y núcleos). Durante estos procesos, la partícula incidente transfiere su energía cinética a los electrones orbitales o al núcleo atómico mediante un amplio espectro de colisiones que varían desde interacciones suaves hasta transferencias totales de energía. Debido a las notables diferencias en masa y carga eléctrica entre electrones, protones, partículas alfa e iones pesados, los mecanismos de interacción y los patrones de deposición de dosis difieren drásticamente entre sí. En consecuencia, la inercia asociada al movimiento de cada partícula y sus respectivas secciones eficaces de interacción determinan comportamientos experimentales y perfiles dosimétricos completamente diferenciados (como el pico de Bragg para partículas pesadas frente al esparcimiento múltiple de los electrones).

Aunque las leyes fundamentales subyacentes son idénticas —regidas por la interacción electromagnética a través de la fuerza de Coulomb—, el comportamiento de las partículas cargadas masivas difiere notablemente del de las ligeras al colisionar con los electrones u orbitales del medio. Por ejemplo, la probabilidad de que un protón o una partícula alfa sea desacelerada por el campo coulombiano del núcleo y emita radiación de frenado (*bremsstrahlung*) es prácticamente despreciable en comparación con la de un electrón o positrón. Esto se debe a que la sección eficaz para este fenómeno es inversamente proporcional al cuadrado de la masa ($1/m^2$) de la partícula incidente, lo que significa que la enorme inercia de los iones pesados suprime casi por completo este canal de pérdida de energía.

En consecuencia, en el contexto de la radioterapia clínica, la producción de *bremsstrahlung* queda prácticamente restringida a los electrones y positrones. Por otro lado, al interactuar

con los electrones orbitales del medio, la naturaleza de las colisiones (suaves o fuertes) y sus probabilidades asociadas dependen intrínsecamente de la masa de la partícula incidente. Estas colisiones coulombianas dan lugar a fenómenos de excitación, ionización o dispersión.

Mientras que las pérdidas de energía por ionización y excitación se cuantifican mediante el poder de frenado —el cual, para los electrones, se divide en una componente colisional (S_{col}) y una componente radiativa (S_{rad})—, las desviaciones angulares del haz se evalúan a través del poder de dispersión. A nivel dosimétrico, la cantidad fundamental es la transferencia lineal de energía (LET), que determina la energía depositada localmente por la partícula a lo largo de su trayectoria. Esta magnitud está estrechamente vinculada con la dosis absorbida (D), la cual se relaciona de forma directa con el poder de frenado de colisión. La contribución radiativa se excluye de este balance local debido a que los fotones de frenado resultantes transportan la energía fuera del volumen de interés clínico.

Es necesario mencionar que, en colisiones coulombianas fuertes, se producen electrones secundarios con alta energía cinética, conocidos como rayos delta (δ). Éstos pueden transportar parte de la energía fuera de la vecindad inmediata de la trayectoria primaria. En ese sentido, es necesario el uso de la definición de LET restringido (LET_{Δ}).

Por otra parte, la enorme diferencia en inercia molecular se manifiesta de forma drástica en el perfil de profundidad (perfil macroscópico de deposición de energía): mientras que las partículas ligeras sufren una intensa dispersión múltiple disipando su energía de manera difusa, las partículas cargadas pesadas (como protones e iones) avanzan prácticamente en línea recta, experimentando una pérdida de energía por unidad de longitud que se eleva exponencialmente justo antes de detenerse (pico de Bragg). Este fenómeno representa la base física de la radioterapia de partículas, permitiendo concentrar la dosis máxima en el volumen tumoral y minimizando simultáneamente el daño en los tejidos sanos circundantes.

En la Figura 3 se comparan las curvas de Porcentaje de Dosis en Profundidad (PDD) para distintos tipos de radiación y energías en un fantoma de agua. Se puede observar el contraste entre partículas ligeras (electrones), partículas masivas (protones) y radiación indirectamente ionizante (fotones). Los fotones de 6 MV, al ser radiación indirectamente ionizante, presentan el efecto de *buildup* o acumulación de dosis cerca de la superficie (el máximo se alcanza alrededor de 1,5 cm). Después de alcanzar el máximo, la dosis decae exponencialmente debido a la atenuación geométrica e intrínseca del haz (interacciones Compton dominantes). Por otro lado, los protones de 147 MeV depositan una dosis relativamente baja y casi constante a lo largo de su recorrido. A medida que penetran, se frenan, su transferencia lineal de energía (LET) se dispara exponencialmente y depositan casi toda su energía justo antes de detenerse por completo a los 15 cm. Mientras tanto, los electrones de 10 MeV experimentan una intensa dispersión elástica múltiple (un alto poder de dispersión) que hace que sus trayectorias sean caóticas y tortuosas. Esto causa que entreguen su energía rápidamente en los primeros centímetros y que la dosis caiga a cero de forma abrupta a baja profundidad (alrededor de 5–6 cm).

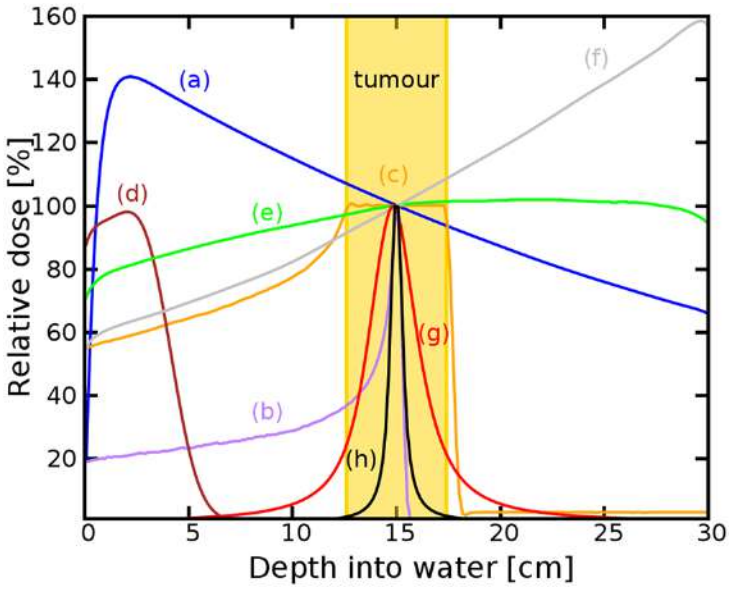


Figura 3: Comparativa de curvas de Porcentaje de Dosis en Profundidad (PDD) en un fantoma de agua para haces de fotones, protones y electrones: (a) Fotones de 6 MV. (b) Pico de Bragg de protones de 147 MeV. (c) Pico de Bragg ensanchado. (d) Electrones de 10 MeV. (e) Electrones colimados de 200 MeV. (f) Electrones colimados de 2 GeV. (g) Electrones de 200 MeV enfocados a 15 cm. (h) Electrones de 2 GeV enfocados a 15 cm..
Fuente: Podgorsak (2005).

Interacciones de neutrones con la materia

Los neutrones son partículas eléctricamente neutras con una masa significativamente mayor que la de los electrones. Debido a la ausencia de carga, las interacciones de tipo coulombiano quedan completamente excluidas de la descripción de su transporte en la materia. En consecuencia, los neutrones se propagan en líneas rectas y cubren distancias macroscópicas considerables antes de experimentar una colisión discreta. Sin embargo, la trayectoria global es un camino aleatorio debido a los choques con los núcleos. Además, un neutrón puede dispersarse en ángulos muy grandes en una sola colisión, especialmente con núcleos ligeros como el hidrógeno. Sus mecanismos de interacción se restringen exclusivamente a la fuerza nuclear fuerte mediante el impacto directo con los núcleos del medio, manifestándose a través de procesos de dispersión elástica e inelástica o de captura neutrónica incluso con neutrones con energía cinética casi nula —la fuerza nuclear fuerte es atractiva para los neutrones—. En este último escenario, al no existir una barrera de repulsión electrostática, el neutrón es absorbido con facilidad por el núcleo, lo que suele generar un estado de inestabilidad cuántica que puede dar origen a un radioisótopo. A diferencia de las partículas cargadas, este comportamiento probabilístico y mecanocuántico no se describe mediante poderes de frenado, sino que se caracteriza estrictamente a partir de las secciones eficaces de dispersión y absorción del material.

Arquitectura esencial de un Sistema de Planificación de Tratamiento

En las secciones anteriores se ha abordado el contexto clínico-físico de la radioterapia externa y los mecanismos fundamentales de interacción de la radiación con la materia. Ahora, el foco está en la tecnología que hace posible la ejecución de estos tratamientos.

En términos generales, un Sistema de Planificación de Tratamiento (SPT) no está vinculado directamente con la biología de la enfermedad, sino con la forma y tamaño del tumor —obtenidos por imágenes de tomografía computarizada (CT) y/o resonancia magnética (MR)— y la física de la radiación. En este sentido, el software, a través de los píxeles de las imágenes, la delimitación de contornos y la equivalencia entre unidades Hounsfield y densidades electrónicas, calcula cómo depositar la energía de forma segura. Por tanto, el SPT es la herramienta que integra los datos anatómicos del paciente y la física de las radiaciones ionizantes.

Esta sección describe, precisamente, esa arquitectura conceptual y los componentes lógicos que estructuran el SPT, detallando cómo estos flujos de datos e imágenes se interpretan en algoritmos de cálculo de dosis —como convolución/superposición y Monte Carlo— y en formatos estandarizados.

Por ende, comprender esta estructura interna es el paso fundamental para, posteriormente, plantear un modelo de desarrollo basado en tecnologías libres. Es decir, la idea es presentar la arquitectura conceptual y el mapa de ruta para que una comunidad de desarrolladores o investigadores lo construya.

Gestión y conectividad de datos médicos

El primer aspecto a tomar en cuenta es la informática en radiooncología, en particular el flujo seguro de datos clínicos y la interoperabilidad de sistemas multicomponente (Law y Liu, 2009). Se debe partir del principio de garantizar que el software pueda comunicarse correctamente con tomógrafos y aceleradores lineales clínicos (LINAC) de cualquier casa comercial, evitando riesgos de corrupción de datos durante la importación y exportación de planes.

En la actualidad, en el entorno de la radioterapia moderna se utiliza el estándar DICOM-RT —una extensión específica del estándar DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*)—. Este protocolo encapsula tanto la información geométrica de la anatomía del paciente (tejidos, órganos) a través de objetos `RT Image` y `CT/MR Image`, como los elementos principales del tratamiento a través de modalidades especializadas:

- **RT Structure Set (RT-STRUCT):** Coordenadas geométricas de los contornos de las estructuras anatómicas y volúmenes blancos.
- **RT Plan:** Geometría del plan de tratamiento, las energías, las posiciones de las láminas del colimador multiláminas (MLC), los pesos de los haces y las prescripciones de dosis.

- **RT Dose:** Matriz de distribución tridimensional de dosis calculada por el sistema.
- **RT Image y RT Treatment Record:** Imágenes de verificación en el posicionamiento y el historial de las sesiones administradas.

Procesamiento de imágenes y segmentación de estructuras

Es fundamental la reconstrucción digital de la anatomía del paciente para llevar a cabo el proceso de planificación de tratamiento. En este sentido, el SPT debe mapear espacialmente la región de interés a partir de las matrices de píxeles de las imágenes importadas de tomografía computarizada (CT) y/o resonancia magnética (MR). En física médica y radiooncología, la segmentación o contorneo consiste en la delimitación geométrica de los Volúmenes Blanco Grosero (GTV), Clínico (CTV) y Planificado (PTV), así como de los Órganos a Riesgo (OAR), siguiendo las recomendaciones internacionales de los reportes ICRU 50, 62 y 83 (International Commission on Radiation Units and Measurements, 1993, 1999, 2010).

Por tanto, el software del SPT requiere herramientas avanzadas para el procesamiento de imágenes (Brock et al., 2017):

- **Interpolación espacial y registro:** Alinear y fusionar diferentes modalidades de imagen (CT, MR o PET) mediante algoritmos de registro rígido y deformable (DIR).
- **Segmentación manual y semiautomática:** Herramientas de interpolación de contornos inter-vistas y detección de bordes basada en gradientes de gris (umbrales de Unidades Hounsfield).
- **Conversión HUD (Hounsfield Unit to Electron Density):** El sistema debe transformar la matriz de atenuación lineal (píxeles en HU) en una matriz de densidad electrónica relativa respecto al agua (ρ_e), paso indispensable para que los algoritmos de cálculo corrijan las heterogeneidades tisulares (tejido óseo, pulmón, aire).

Modelado del haz y configuración dosimétrica

El cálculo de dosis por parte de un SPT requiere la caracterización dosimétrica de la unidad de tratamiento (acelerador lineal o unidad de Co-60) mediante un proceso denominado modelado del haz (*beam modeling*). Para tal fin, es indispensable cargar los datos experimentales medidos en un fantoma de agua bajo condiciones estandarizadas (Das et al., 2008, véase también AAPM TG-106):

- **Rendimientos de dosis en profundidad (PDD) o Razones Tejido-Fantoma (TPR).**
- **Perfiles de dosis (*profiles*):** Curvas transversales en los ejes principales y diagonales a diferentes profundidades, utilizadas para caracterizar la simetría, la homogeneidad y la penumbra del haz tanto en aire como en agua.

- **Factores de salida (*output factors*):** Variación de la tasa de dosis en función del tamaño del campo de radiación.

A nivel de software, el SPT debe reproducir matemáticamente los componentes físicos del cabezal de la unidad de tratamiento. Esto abarca desde la fuente primaria de fotones y el filtro aplanador (o modelos sin filtro, FFF), hasta los colimadores secundarios y el Colimador Multiláminas (MLC). El algoritmo encargado de modelar el MLC debe simular con extrema precisión los efectos geométricos y radiológicos de las láminas, incluyendo la transmisión intrínseca a través de la lámina, la fuga entre láminas (*interleaf leakage*), el redondeo de los extremos de las láminas (*rounded leaf-end penumbra*) y el desfase de posición (*leaf gap*). La caracterización de estas variables es crítica para el éxito físico y clínico de técnicas avanzadas de alta modulación como IMRT y VMAT (Boyer et al., 2001, véase también AAPM TG-50).

Motores de cálculo de dosis

Un aspecto obligatorio a considerar en el diseño de un SPT es la arquitectura del software destinada a procesar datos, ejecutar algoritmos y resolver las ecuaciones matemáticas derivadas de la física de las radiaciones para el cálculo exacto de la distribución y depósito de la energía dentro del paciente; es decir, cómo se simula el transporte de la radiación. En el ámbito informático, cobra relevancia el tipo de motor de cálculo (núcleo matemático) que utilizará el SPT, siendo este el componente fundamental para predecir la energía depositada por unidad de masa en el medio.
Los motores de cálculo varían en su complejidad y se dividen en tres categorías básicas:

- **Simulación de Monte Carlo:** Utiliza modelos estocásticos basados en la teoría de probabilidades y secciones eficaces de interacción para rastrear las trayectorias individuales de millones de fotones y partículas cargadas. Ofrece una precisión insuperable en zonas de desequilibrio electrónico lateral y en interfaces complejas de tejido-aire o tejido-hueso (Andreo, 1991).

- **Algoritmos de Convolución/Superposición:** Separan el cálculo en dos etapas. Primero, determinan la distribución de energía primaria liberada en el medio (Kerma de colisión) a partir del flujo de fotones. Segundo, mediante la operación matemática de convolución, integran esa distribución espacial con una función de dispersión energética o núcleo (*kernel*), el cual describe cómo los electrones secundarios depositan su energía localmente. El modelo de Convolución de Conos Colapsados (*Collapsed Cones Convolution*, CCC), que utiliza matrices de energía depositada (EDK), optimiza este proceso al agrupar los vectores de transporte en conos discretos, logrando un balance excepcional entre precisión clínica y tiempo de cálculo (Ahnesjö, 1989).

- **Algoritmos Analíticos / Basados en Corrección:** Utilizan funciones analíticas medidas en agua y aplican factores de corrección empíricos (como el método del Ratio de Power-Tar o la corrección de longitud de camino equivalente) para aproximar los efectos de las heterogeneidades. Tienen severas limitaciones en interfaces de tejidos de densidades muy disímiles como pulmón-tumor (Papanikolaou et al., 2004).

Estándares de calidad y entorno regulatorio

En el ámbito clínico, debido a que un SPT está clasificado legal y reglamentariamente como un dispositivo médico, su despliegue debe cumplir estrictamente con los protocolos internacionales de garantía de calidad y seguridad radiológica. Esto es fundamental para mitigar el riesgo de que un error algorítmico pueda provocar subdosificaciones tumorales o sobreexposiciones periféricas letales.

En este sentido, la referencia global mandatoria es el reporte IAEA Technical Reports Series No. 430 (TRS-430): *Commissioning and Quality Assurance of Computerized Planning Systems for Radiation Treatment of Cancer* (International Atomic Energy Agency, 2004). Esta norma técnica define los tests de aceptación obligatorios, las pruebas de consistencia anatómica, la verificación de los algoritmos en fantomas geométricos inhomogéneos (como el fantoma del AAPM TG-23 o el IAEA TECDOC-1540) y las tolerancias aceptables para las desviaciones entre la dosis calculada por el sistema y la medida experimentalmente en el laboratorio.

Propuesta de ruta para un SPT basado en Tecnologías Libres

El diseño y desarrollo desde cero de un Sistema de Planificación de Tratamiento (SPT) comercial requiere de personal altamente calificado, años de investigación y una elevada inversión de recursos financieros. Esta barrera económica y técnica suele limitar la soberanía tecnológica en el desarrollo de software médico de alta complejidad, un factor de vital importancia para garantizar la equidad en el acceso al tratamiento oncológico a nivel global.

No obstante, en la actualidad es posible aprovechar el ecosistema de las comunidades de código abierto (*Open Source*) y el avance de las tecnologías libres para plantear una alternativa emergente y con un alto grado de viabilidad. La estrategia radica en concebir el SPT como un modelo de integración modular de componentes de alto rendimiento preexistentes.

El pivote fundamental de esta propuesta descansa en los principios de ecosistemas abiertos y modularidad; es decir, una arquitectura de software basada en módulos independientes acoplados mediante interfaces de programación de aplicaciones (API). De esta manera, por un lado, se reduce el riesgo de fallos en cascada y, por otro lado, cada componente especializado puede desarrollarse de forma independiente. Por tanto, el SPT libre propuesto se estructura en tres capas fundamentales e independientes:

1. **Interfaz de usuario y visualización (Front-end):** Encargada de la interacción con el planificador (físico médico/radiooncólogo), el despliegue de imágenes médicas en 2D/3D y el contorneo de regiones de interés (ROI).
2. **Gestión de datos y conectividad (Middleware):** Control del flujo de archivos DICOM-RT, garantizando la consistencia de las bases de datos dosimétricas y de pacientes.

3. **Capa de cálculo y optimización (Back-end):** Destinado exclusivamente a ejecutar las simulaciones de transporte de radiación y los algoritmos de optimización de perfiles de intensidad.

Ahora bien, la estrategia a seguir es realizar la integración de componentes libres existentes y ampliamente validados por la comunidad científica internacional para garantizar la viabilidad de la propuesta de SPT libre. En ese sentido, para operativizar una propuesta de SPT, se proponen los siguientes componentes como sustitutos idóneos de los módulos comerciales tradicionales:

1. **Interfaz y visualización 3D:** Se propone utilizar 3D Slicer como plataforma base (Fedorov et al., 2012). Específicamente, se contempla el uso de las herramientas de radioterapia integradas en la extensión SlicerRT, la cual ya provee las estructuras básicas y los algoritmos necesarios para importar objetos DICOM-RT, visualizar distribuciones de isodosis y computar histogramas dosis-volumen (DVH) con precisión clínica (Pinter et al., 2012). La comunicación e intercambio de datos entre este entorno gráfico y las capas subyacentes se realiza eficientemente mediante scripts de automatización basados en la API de Python.

2. **Procesamiento y registro:** Para las operaciones de registro de imágenes rígido y deformable (DIR), así como para la manipulación y conversión de matrices de atenuación lineal, se incorpora Plastimatch (Shackleford et al., 2010). Este software libre, ejecutable mediante líneas de comando o librerías nativas de C++, está optimizado para la aceleración por hardware mediante unidades de procesamiento gráfico (GPU) y computa con alta eficiencia algoritmos de flujo óptico y *splines* de placa delgada.

3. **Motor de cálculo dosimétrico estocástico:** El transporte de las partículas y el depósito de energía se delegan a códigos consolidados en la física de las radiaciones. Para la investigación y validaciones de alta fidelidad, se plantea el uso de Geant4/GATE (Agostinelli et al., 2003; Jan et al., 2004), el estándar global de simulación de Monte Carlo desarrollado con el respaldo de la Colaboración del CERN. Por otra parte, para la transferencia a la rutina de trabajo clínica —donde el tiempo de cómputo es crítico— se incorpora MCsquare (Souris et al., 2016), un motor de Monte Carlo rápido diseñado específicamente para radioterapia, optimizado para ejecutarse en arquitecturas de CPU multinúcleo comerciales. En ambos escenarios, la información geométrica, anatómica y de configuración del haz es empaquetada en formatos estándar DICOM-RT para su correcto procesamiento en el núcleo numérico.

Desarrollo, validación y licenciamiento de la herramienta

A continuación, se presenta la ruta metodológica diseñada para transformar la propuesta conceptual en una herramienta operativa:

1. **Fase 1: Enlazamiento de la interfaz de 3D Slicer con las librerías de Plastimatch**

Se deben desarrollar los scripts de comunicación en Python y C++ necesarios para enlazar la interfaz gráfica de 3D Slicer con las librerías nativas de Plastimatch y los archivos de entrada (*input files*) que administra los códigos de Monte Carlo. También, en esta etapa se configura y calibra el módulo de conversión de Unidades Hounsfield a densidades electrónicas del paciente (ρ_e), asegurando la correcta lectura de la matriz de píxeles anatómicos.

2. **Fase 2: Modelado informático del cabezal del acelerador lineal**
   Consiste en el modelado geométrico y radiológico del cabezal del acelerador lineal (o unidad de Co-60) dentro del motor de cálculo estocástico seleccionado (Geant4/GATE o MCsquare). Esta fase inicia con la carga, ajuste y optimización virtual de los datos dosimétricos obligatorios recopilados experimentalmente —rendimientos de dosis en profundidad (PDD), perfiles de dosis (*profiles*) y factores de salida (*output factors*)— en condiciones estándar de referencia en un fantoma de agua, hasta lograr que la simulación numérica del software libre sintonice con la realidad física de la clínica (Das et al., 2008, véase también AAPM TG-106).

3. **Fase 3: Aplicación estricta del protocolo IAEA TRS-430**
   Validar la dosimetría y el control de calidad a través del protocolo IAEA TRS-430 (International Atomic Energy Agency, 2004). En esta fase se realiza la ejecución automatizada y sistemática de los casos de prueba geométricos e inhomogéneos en fantomas virtuales estandarizados (como los sugeridos en el IAEA TECDOC-1540). Las desviaciones entre la dosis simulada y la medida experimental deben estar por debajo de las tolerancias internacionales generales (menor al 2 % en regiones homogéneas y menor al 5 % en zonas de alto gradiente).

4. **Fase 4: Establecimiento del entorno jurídico del SPT**
   Para el marco legal y licenciamiento abierto, se propone el uso de una licencia protectora del conocimiento libre y compatible (GPLv3) al integrar componentes con diferentes licencias preexistentes, con el fin de que el código desarrollado permanezca abierto para la auditoría científica internacional y la cooperación interinstitucional, impidiendo su privatización y consolidando la soberanía tecnológica nacional.

Reflexiones finales

El desarrollo de Sistemas de Planificación de Tratamiento (SPT) basados en tecnologías libres representa una ventaja estratégica no solo para la democratización del acceso al tratamiento oncológico, sino para el fortalecimiento y avance de la investigación científica y la formación académica avanzada en física médica y radiobiología.

La viabilidad de un SPT libre descansa sobre una filosofía de integración modular. Al articular componentes preexistentes de alto rendimiento y ampliamente validados por la comunidad científica internacional —tales como 3D Slicer/SlicerRT para el entorno gráfico, Plastimatch para el procesamiento de imágenes, y Geant4/GATE o MCsquare para el núcleo de cálculo estocástico—, se traza una ruta factible y sólida.

Bajo este enfoque, el sistema se concibe formalmente como una arquitectura de software abierta, la cual tiene un entorno natural y nativo de despliegue en sistemas operativos GNU/Linux y tecnologías de virtualización a nivel de sistema operativo como contenedores Docker, garantizando así la portabilidad, escalabilidad y aislamiento de los procesos numéricos.

Finalmente, se entrega así una base estructural sólida, diseñada para que una comunidad abierta de investigadores, desarrolladores y físicos médicos sumen esfuerzos en favor de la soberanía tecnológica nacional y la construcción colectiva del conocimiento libre.

Referencias

Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., Asai, M., Axen, D., Banerjee, S., Barrand, G., Behner, F., Bellagamba, L., Boudreau, J., Broglia, L., Brun, A., Brunengo, H., Burkhardt, H., Busatta, S., Caballero, M., et al. (2003). GEANT4—a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, *506*(3), 250-303. https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8

Ahnesjö, A. (1989). Collapsed cone convolution of radiant energy for photon dose calculation in heterogeneous media. *Medical Physics*, *16*(4), 577-592. https://doi.org/10.1118/1.596360

American Cancer Society. (2024). Signs and Symptoms of Cancer. https://www.cancer.org/cancer/diagnosis-staging/signs-and-symptoms-of-cancer.html

Andreo, P. (1991). Monte Carlo techniques in medical radiation physics. *Physics in Medicine and Biology*, *36*(7), 861-920. https://doi.org/10.1088/0031-9155/36/7/001

Baskar, R., Lee, K., Yeo, R., y Yeoh, K. (2012). Cancer and Radiation Therapy: Current Advances and Future Directions. *International Journal of Medical Sciences*, *9*(3), 193-199. https://doi.org/10.7150/ijms.3635

Bichsel, H., y Schindler, H. (2020). The Interaction of Radiation with Matter. En C. Fabjan y H. Schopper (Eds.), *Particle Physics Reference Library*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35318-6_2

Boyer, A., Biggs, P., Galvin, J., Klein, E., LoSasso, T., Low, D., Mah, K., y Yu, C. (2001). Basic Applications of Multileaf Collimators. https://doi.org/10.37206/71

Brock, K., Mutic, S., McNutt, T., Li, H., y Kessler, M. (2017). Use of image registration and fusion algorithms and techniques in radiotherapy: Report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 132. *Medical Physics*, *44*(7), e43-e76. https://doi.org/10.1002/mp.12256

Cunningham, J., y Dance, D. (2014). Interactions of Radiation with Matter. En *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students* (pp. 11-33). IAEA. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1564webNew-74666420.pdf

Das, I., Cheng, C., Watts, R., Ahnesjö, A., Gibbons, J., Li, X., Lowenstein, J., Mitra, R., Simon, W., y Zhu, T. (2008). Accelerator beam data commissioning equipment and procedures: Report of the TG-106 of the Therapy Physics Committee of the AAPM. *Medical Physics*, *35*(9), 4186-4215. https://doi.org/10.1118/1.2969070

Fedorov, A., Beichel, R., Kalpathy-Cramer, J., Finet, J., Fillion-Robin, J. C., Pujol, S., Bauer, C., Jennings, D., Fennessy, F., Sonka, M., Buatti, J., Aylward, S., Miller, J., D'Asaro, S., Muschanom, M., y Kikinis, R. (2012). 3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network. *Magnetic Resonance Imaging*, *30*(9), 1323-1341. https://doi.org/10.1016/j.mri.2012.05.001

Fidler-Benaoudia, M., y Bray, F. (2020). Transitions in human development and the global cancer burden. En C. P. Wild, E. Weiderpass y B. W. Stewart (Eds.), *World cancer report: Cancer research for cancer prevention*. International Agency for Research on Cancer. http://publications.iarc.fr/586

Hipócrates. (1988). *Tratados hipocráticos IV: Tratados ginecológicos (Sobre las enfermedades de las mujeres, Sobre las mujeres estériles, Sobre las enfermedades de las vírgenes, Sobre la superfetación, Sobre la excisión del feto, Sobre la naturaleza de la mujer)* (L. S. Mingote, Trad.). Editorial Gredos. https://www.academia.edu/19661492/Hipocrates_Tratados_hipocraticos

International Agency for Research on Cancer. (2024). *Venezuela: Source GLOBOCAN 2022* (Hoja de datos). World Health Organization. https://gco.iarc.who.int/media/globocan/factsheets/populations/862-venezuela-fact-sheet.pdf

International Atomic Energy Agency. (2004). *Commissioning and quality assurance of computerized planning systems for radiation treatment of cancer* (inf. téc. N.º Technical Reports Series No. 430). International Atomic Energy Agency. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS430_web.pdf

International Atomic Energy Agency. (2023). What is radiation therapy? https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-radiation-therapy

International Commission on Radiation Units and Measurements. (1993). *Prescribing, recording, and reporting photon beam therapy* (inf. téc. N.º ICRU Report 50). Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/jicru/os26.1.Report50

International Commission on Radiation Units and Measurements. (1999). *Prescribing, recording, and reporting photon beam therapy (Supplement to ICRU Report 50)* (inf. téc. N.º ICRU Report 62). Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/jicru/os32.1.Report62

International Commission on Radiation Units and Measurements. (2010). *Prescribing, recording, and reporting photon-beam intensity-modulated radiation therapy (IMRT)* (inf. téc. N.º ICRU Report 83). Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/jicru/ndq002

Jan, S., Santin, G., Strul, D., Staelens, S., Assié, K., Autret, D., Avner, S., Barbier, R., Bardiès, M., Bloomfield, P., Brasse, D., Breton, V., Bruyndonckx, P., Buvat, I., Chatziioannou, A., Choi, Y., Chung, Y., Comtat, C., Crispim, D., et al. (2004). GATE: a simulation toolkit for PET and SPECT. *Physics in Medicine & Biology*, *49*(19), 4543-4561. https://doi.org/10.1088/0031-9155/49/19/007

Law, M., y Liu, B. (2009). *Informatics in Radiation Oncology*. CRC Press.

Organismo Internacional de Energía Atómica. (2019). *Control del cáncer: El papel de la física médica y la radioterapia* (inf. téc. N.º Boletín 60-3). Organismo Internacional de Energía Atómica. https://www.iaea.org/sites/default/files/2025-09/bull603cancercontrolweb_0.pdf

Organización Mundial de la Salud. (2023). Cáncer. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cancer

Papanikolaou, N., Battista, J., Boyer, A., Kappas, C., Klein, E., Mackie, T., Sharpe, M., y Van Dyk, J. (2004). Tissue Inhomogeneity Corrections for Megavoltage Photon Beams. https://doi.org/10.37206/86

Pinter, C., Lasso, A., Wang, A., Jaffray, D., y Fichtinger, G. (2012). SlicerRT: Radiation therapy research toolkit for 3D Slicer. *Medical Physics*, *39*(10), 6332-6338. https://doi.org/10.1118/1.4754659

Podgorsak, E. (Ed.). (2005). *Radiation oncology physics: A handbook for teachers and students*. International Atomic Energy Agency. https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1196_web.pdf

Salaverry, O. (2013). La etimología del cáncer y su curioso curso histórico. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, *30*(1), 137-141. https://doi.org/10.1590/s1726-46342013000100026

Sarria, G., Martinez, D., Li, B., Del Castillo, R., Salgado, A., Pinillos, L., Felix, A., Bobadilla, I., Ferraris, G., Castilho, M., Carmona, J., Leon, B., Aviles, L., Ricagni, L., Isa, N., Flores, C., Giordano, F., Zubizarreta, E., Polo, A., y Sarria, G. (2022). Leveling Up the Access to Radiation Therapy in Latin America: Economic Analysis of Investment, Equity, and Inclusion Opportunities Up to 2030. *International Journal of Radiation Oncology*Biology*Physics*, *116*(2), 448-458. https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2022.12.012

Shackleford, J., Kandasamy, N., y Sharp, G. (2010). On developing B-spline registration algorithms for multi-core processors. *Physics in Medicine and Biology*, *55*(21), 6329-6351. https://doi.org/10.1088/0031-9155/55/21/001

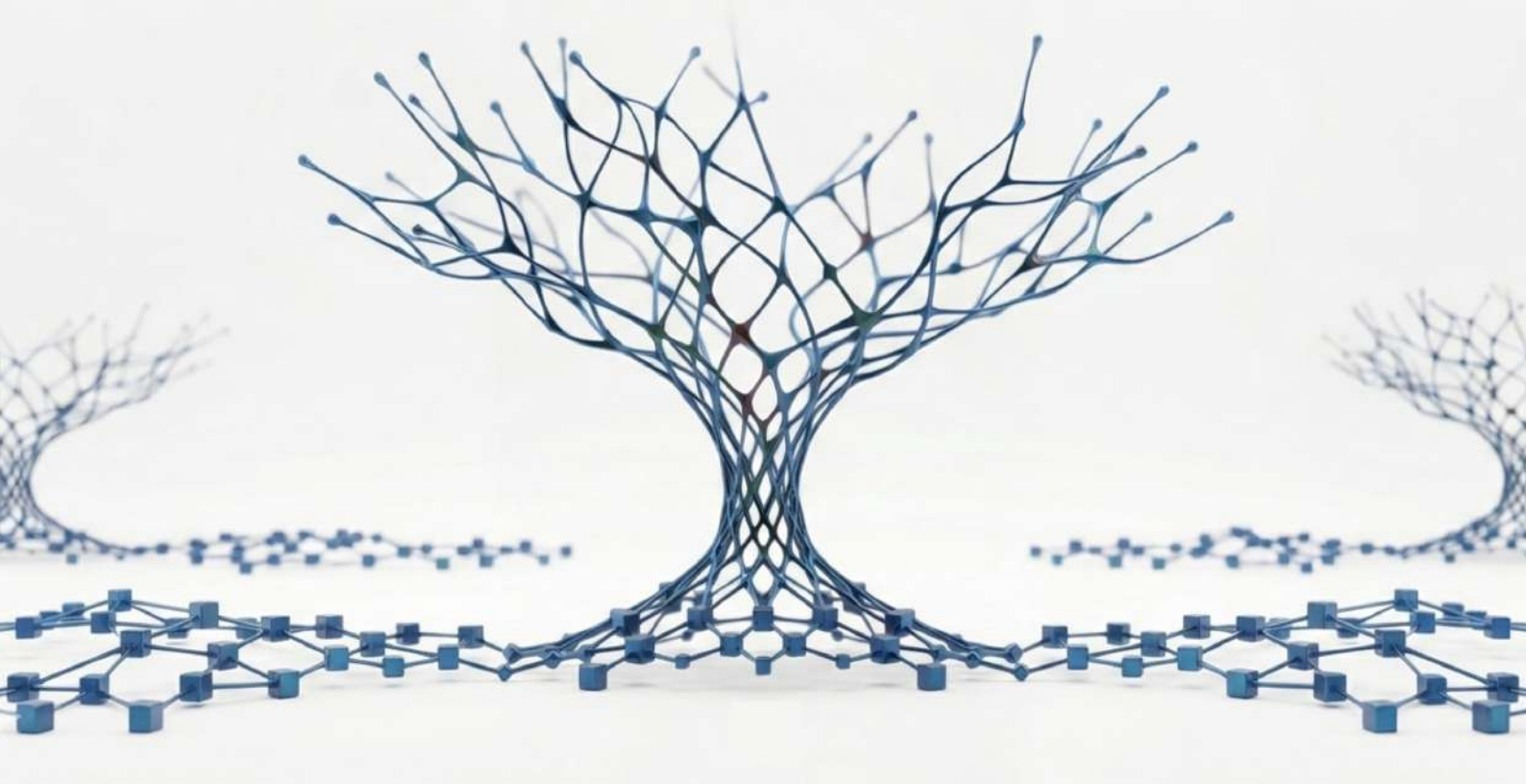
Souris, K., Lee, J., y Sterpin, E. (2016). Fast multipurpose Monte Carlo simulation for proton therapy using multi- and many-core CPU architectures. *Medical Physics*, *43*(4), 1700-1712. https://doi.org/10.1118/1.4943377

Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R., Laversanne, M., Soerjomataram, I., Jemal, A., y Bray, F. (2021). Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, *71*(3), 209-249. https://doi.org/10.3322/caac.21660

World Health Organization. (2026). Cancer. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cancer

Zaparolli, D. (2019). Tratamiento accesible: Un sistema computacional desarrollado en la Unicamp de código abierto reduce el costo de la planificación de la radioterapia. *Revista Pesquisa Fapesp*, (279). https://revistapesquisa.fapesp.br/es/tratamiento-accesible/

Autores



Autores

Daniel Quintero

Historiador, Abogado y Doctor en Ciencias Humanas, egresado de la Universidad de Los Andes (ULA). Actualmente se desempeña como docente en la ULA, y como investigador en el Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL). Autor y director de publicaciones académicas y de divulgación científica.

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5330-5690
Correo electrónico: dquintero@cenditel.gob.ve

Santiago Roca

Politólogo egresado de la Universidad de Los Andes (ULA), Especialista en Sistemología Interpretativa, Magíster en Ciencias Políticas y Doctor en Gestión para la Creación Intelectual. Investigador del Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL). Editor y autor de publicaciones académicas y de divulgación científica, y coordinador de proyectos de conocimiento y tecnologías libres.

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3701-3409
Correo Electrónico: sroca@cenditel.gob.ve

Aida Andrade

Economista, Licenciada en Educación y Magister Scientiae en Educación, mención Informática y Diseño Instruccional, egresada de la Universidad de Los Andes. Actualmente se desempeña como Investigadora en el Centro de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL). Autora de publicaciones académicas y de divulgación científica.

ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9358-5467
Correo Electrónico: aandrade@cenditel.gob.ve

Yazmary Rondón

Licenciada en Educación mención Matemática, MSc. en Educación mención Informática y Diseño Instruccional y Doctora en Educación, egresada de la Universidad de Los Andes. Profesora Titular de la ULA, docente en pregrado y postgrado en la Facultad de Humanidades y Educación. Tutora y jurado de tesis de pregrado, maestría y doctorado. Investigadora PEI- ULA 2025 e investigadora en el Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL). Autora y editora de publicaciones académicas y de divulgación científica.

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5156-221X
Correo Electrónico: yrondon@cenditel.gob.ve

María Alejandra Rujano

Ingeniero Industrial egresada de la Universidad Yacambú, con Maestría en Modelado en Simulación de Sistemas (ULA), Doctora en Gestión para la Creación Intelectual y candidata a Doctora en Ciencias Organizacionales. Actualmente se desempeña como Investigadora en el Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL). Cuenta con experiencia como autora y editora de publicaciones académicas y de divulgación científica.

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3853-4182
Correo Electrónico: mrujano@cenditel.gob.ve

María Eugenia Acosta

Ingeniero Civil egresada del Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño (IUPSM), MSc. en Educación Superior mención Docencia Universitaria, Doctora en Ciencias de la Educación y Postdoctora en Investigación Educativa. Actualmente se desempeña como docente en la Universidad Politécnica Territorial del Estado Mérida Kléber Ramírez (UPTM Kléber Ramírez), y como investigadora en el Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL). Autora y editora de publicaciones académicas y de divulgación científica.

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4226-0666
Correo Electrónico: macosta@cenditel.gob.ve

Pablo Sulbarán

Ingeniero de Sistemas egresado de la Universidad de Los Andes. Actualmente, se desempeña como Analista de Desarrollo en el Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL). Autor de publicaciones académicas y de divulgación científica.

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8422-1024
Correo Electrónico: psulbaran@cenditel.gob.ve

Jesús Erazo

Licenciado en Física y Magíster en Física Fundamental, egresado de la Universidad de Los Andes. Actualmente se desempeña como docente en la ULA y como investigador en el Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL). Autor y editor de publicaciones académicas y de divulgación científica.

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3719-6783
Correo Electrónico: jerazo@cenditel.gob.ve

Otros títulos de la colección

Los desafíos de la COVID-19

Perspectivas, retos y alternativas tecnológicas desde una mirada latinoamericana

Año: 2021

Derecho de Autor © 2021 Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL).

Algunos Derechos Reservados – Copyleft.

Depósito Legal: ME2021000382

ISBN: 978-980-7154-20-8

Autores: María Rujano, Julie Vera, Luz Chourio, María Acosta, Yazmary Rondón, Isabel Cassino, Arelis Guzmán, Oscar González, Santiago Roca, Jesús Erazo, Daniel Quintero.

Sitio oficial: https://convite.cenditel.gob.ve/libros/

La Inteligencia Artificial

Reflexiones sobre los desafíos de una tecnología divergente

Año: 2022

Derecho de Autor © 2022 Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL).

Algunos Derechos Reservados – Copyleft.

Depósito Legal: ME2022000201

ISBN: 978-980-7154-21-5

Autores: Daniel Quintero, Santiago Roca, Gloria Rondón, María Alejandra Rujano, Yazmary Rondón, María Eugenia Acosta, Carlos González, Jesús Erazo y Pablo Sulbarán.

Sitio oficial: https://convite.cenditel.gob.ve/libros/

Conocimiento Libre Ante la Dominación Tecnológica

Desentrañando el Capitalismo Cognitivo

Año: 2023

Derecho de Autor © 2023 Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL).

Algunos Derechos Reservados – Copyleft.

Depósito Legal: ME2023000256

ISBN: 978-980-7154-22-2

Autores: Daniel Quintero, Jesús Erazo, Pablo Sulbarán, Santiago Roca, María Alejandra Rujano, Oscar González, Lisbeth Rengifo, Yazmary Rondón, y María Eugenia Acosta.

Sitio oficial: https://convite.cenditel.gob.ve/libros/

Robótica: Promesas, utopía o futuro distópico

Año: 2024

Derecho de Autor © 2024 Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL).

Algunos Derechos Reservados – Copyleft.

Depósito Legal: ME2024000252

ISBN: 978-980-18-4963-62

Autores: María Eugenia Acosta, Pablo Sulbarán, Yazmary Rondón, Carlos González, Jimena Pérez, María Alejandra Rujano, Santiago Roca y Jesús Erazo.

Sitio oficial: https://convite.cenditel.gob.ve/libros/

Ciberseguridad en la era de la convergencia tecnológica

Nuevos retos y oportunidades para salvaguardar la información digital

Año: 2025

Derecho de Autor © 2025 Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres (CENDITEL).

Algunos Derechos Reservados – Copyleft.

Depósito Legal: ME2025000228

ISBN: 978-980-7154-24-6

Autores: Daniel Quintero, María Alejandra Rujano, Carlos González, Aida Andrade, Jesús Erazo, Santiago Roca, Pablo Sulbarán, Yazmary Rondón y María Eugenia Acosta.

Sitio oficial: https://convite.cenditel.gob.ve/libros/

Tecnologías Libres

para el desarrollo estratégico de la nación

COLECCIÓN: Oscar Varsavsky
SERIE: Pensamiento crítico sobre la contemporaneidad tecnológica

SECCIÓN 1: HARDWARE LIBRE, APROPIACIÓN SOCIAL Y SOBERANÍA TECNOLÓGICA

- Inteligencia artificial libre: Retos estratégicos para el desarrollo venezolano.
  Daniel Quintero
- Construir la viabilidad del hardware científico abierto: Estudio de caso del microscopio OpenFlexure.
  Santiago Roca
- El derecho a reparar como práctica de soberanía tecnológica: Fundamentos y estrategias para nodos de reparación comunal en las instituciones educativas venezolanas.
  Aida Andrade
- Aprender para compartir: El impacto del uso de las Tecnologías Libres en Toparquía.
  Yazmary Rondón

SECCIÓN 2: TECNOLOGÍAS LIBRES APLICADAS A LA GESTIÓN PÚBLICA Y SOCIAL

- Autonomía cognitiva y Tecnologías Libres en la gestión de empresas de triple impacto.
  María Alejandra Rujano
- Tecnologías Libres en la gestión de proyectos de construcción.
  María Eugenia Acosta
- Estándares abiertos para sistemas de infraestructura crítica: Un enfoque hacia la soberanía tecnológica.
  Pablo Sulbarán

SECCIÓN 3: TECNOLOGÍAS LIBRES EN EL SECTOR SALUD Y ALTA COMPLEJIDAD

- Desarrollo de un sistema de planificación de tratamiento en radioterapia externa: Principios conceptuales y una ruta hacia las Tecnologías Libres.
  Jesús Erazo

ISBN: 978-980-7154-26-0

CIENCIA Y TECNOLOGÍA

CONVITE CENDITEL

CENDITEL