

Hacia el desarrollo de infraestructuras eficientes y sostenibles en América Latina

Oportunidades y beneficios
de la digitalización
para los sectores
de la energía eléctrica,
la movilidad y la logística

Resumen ejecutivo

Título:

Hacia el desarrollo de infraestructuras eficientes y sostenibles en América Latina:
oportunidades y beneficios de la digitalización para los sectores de la energía eléctrica,
la movilidad y la logística. Resumen ejecutivo.

Depósito Legal: DC2021001557

ISBN: 978-980-422-251-1

Editor: CAF

Antonio Silveira, Gerente de Infraestructura Física y Transformación Digital

Sandra Conde, Directora de Energía y Transporte

Claudia Flores, Directora (e) de Transformación Digital

Coordinación del estudio:

Mauricio Agudelo, Coordinador de la Agenda Digital y del Observatorio CAF para el Ecosistema Digital (director del estudio)

Eduardo Chomali (director del estudio), Jesús Suniaga, (coordinación editorial y revisión),

Alejandro Forero, Emily Carrera y Mary Simoes

Revisión sectorial:

Sector de energía: Fernando Branger y Frank Vanoy

Sector de movilidad: Soraya Azán, Andrés Alcalá y Milnael Gómez

Sector de logística e integración: Rafael Farromeque, Carolina Rueda, Mercedes Pedreira y Rodrigo Alarcón

Autores:

Julián Gómez Pineda (Tachyon Consultores)

Oswaldo Bejarano (Tachyon Consultores)

Pablo Roda (Económica Consultores)

Francisco Perdomo (Económica Consultores)

Revisión y edición de contenidos: Ana Gerez

Diseño gráfico: Estudio Bilder / Buenos Aires

Las ideas y planteamientos contenidos en la presente edición son de exclusiva responsabilidad de sus autores
y no comprometen la posición oficial de CAF.

La versión digital de este libro se encuentra en: scioteca.caf.com

Copyright © 2021 Corporación Andina de Fomento. Esta obra está licenciada bajo
la Licencia Creative Commons Atribución-No-Comercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Para ver una copia de esta licencia, visita <http://creativecommons.org/by-nc-nd/4.0/>.



Resumen ejecutivo

Los avances tecnológicos en los sectores de la electrónica, la informática y las telecomunicaciones han resultado en una creciente capacidad para almacenar, procesar y transmitir grandes volúmenes de datos a cada vez menos costo. La digitalización, entendida como el uso de tecnologías y datos digitales y su interconexión, está resultando en actividades nuevas o cambios en las existentes y se ha convertido en un habilitador clave para las actividades económicas e industriales. Las infraestructuras que proporcionan servicios de energía, movilidad y logística no son ajenas a esa evolución.

Si bien la digitalización de las infraestructuras tiene el potencial de generar cambios trascendentales en todos los sectores y cerrar brechas de desarrollo, el grado de adopción de esta tecnología disruptiva es muy variado entre países y regiones del mundo. América Latina ha logrado avances importantes en la materia, pero la transición digital es aún incipiente si se compara con otras regiones.

En este reporte se presentan los resultados de un estudio en profundidad sobre la digitalización de las infraestructuras y los activos físicos de los sectores de la energía eléctrica, la movilidad y la logística. En él, se analizan las principales tendencias y las oportunidades que ofrece la digitalización de las infraestructuras. Además, se presenta una metodología para el análisis del costo-beneficio de la digitalización en cada uno de estos sectores y cómo utilizarla.

A partir de un conjunto de experiencias internacionales, el reporte caracteriza el uso de estas tecnologías, sopesa sus beneficios y costos e identifica los incentivos y barreras que determinan su desarrollo. Además, presenta una guía para formular y evaluar la implementación de esta tecnología cuando se formulan y ejecutan proyectos de infraestructura en esos sectores.

El objetivo de este trabajo es contribuir al impulso de la digitalización en los sectores analizados por su poder para transformar los procesos de diseño, planificación, gestión y prestación de servicios. Para ello, ofrece una serie de conclusiones y recomendaciones sobre políticas e instrumentos que pueden impulsar la transformación digital en beneficio de instituciones, empresas y ciudadanos en América Latina.

Digitalización de las infraestructuras

Cambio tecnológico y convergencia de las industrias electrónica, informática y de telecomunicaciones

Los avances tecnológicos de las industrias de telecomunicaciones, electrónica e informática están conduciendo a los albores de la Cuarta Revolución Industrial. Esta nueva era se caracteriza por «(...) un internet más ubicuo y móvil, por sensores más pequeños y potentes, que son cada vez más baratos, y por la inteligencia artificial y el aprendizaje automático» (Schwab, 2016). Las bases que la cimientan son tecnologías preexistentes, algunas de las cuales corresponden a innovaciones incrementales, pero también a invenciones e innovaciones disruptivas con un alto potencial transformacional (ver la Figura 1).

De acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 2019), las tecnologías digitales

que impulsarán esa transformación son la inteligencia artificial (IA), el internet de las cosas (IdC)¹, las redes 5G, la computación en la nube (*cloud computing*), los datos masivos, más conocidos por su término inglés *big data*, la analítica de datos (*data analytics*), las cadenas de bloques (*blockchain*) y la creciente capacidad de cómputo. La OCDE indica que el ecosistema conformado por dichas tecnologías: «(...) es mucho más fuerte y funcional que sus componentes individuales porque interoperan y se complementan entre sí, abriendo nuevas posibilidades. Algunas de estas tecnologías ya han llegado y forman parte de nuestra vida diaria. Otras todavía están en el horizonte²».

¿Qué es la digitalización de las infraestructuras?

La OCDE (2019) define la digitalización como “(...) el uso de tecnologías y datos digitales, así como la interconexión que da como resultado actividades nuevas o cambios en las actividades existentes”. A su vez la transformación digital se refiere a “(...) los efectos económicos y sociales de la digitalización”.

En una primera aproximación, la digitalización pareciera concentrarse en los datos, los cuales están asociados a personas, empresas, gobiernos y las transacciones que

estos realizan entre sí. Sin embargo, los datos también pueden obtenerse por medio del internet de las cosas, que permite compilar información sobre el comportamiento del mundo físico, tales como mediciones, imágenes, localización de personas y objetos, o como resultado de la interacción entre las máquinas (M2M, por sus siglas en inglés). Estos datos generados a partir de múltiples fuentes son transportados por una diversidad de redes alámbricas o inalámbricas (FTTx, 4G, 5G, LoRa) y luego son depurados, almacenados, verificados, gestionados y

¹ También conocido por su abreviación en inglés IoT (*internet of things*).

² Traducción libre del inglés.

Telecomunicaciones

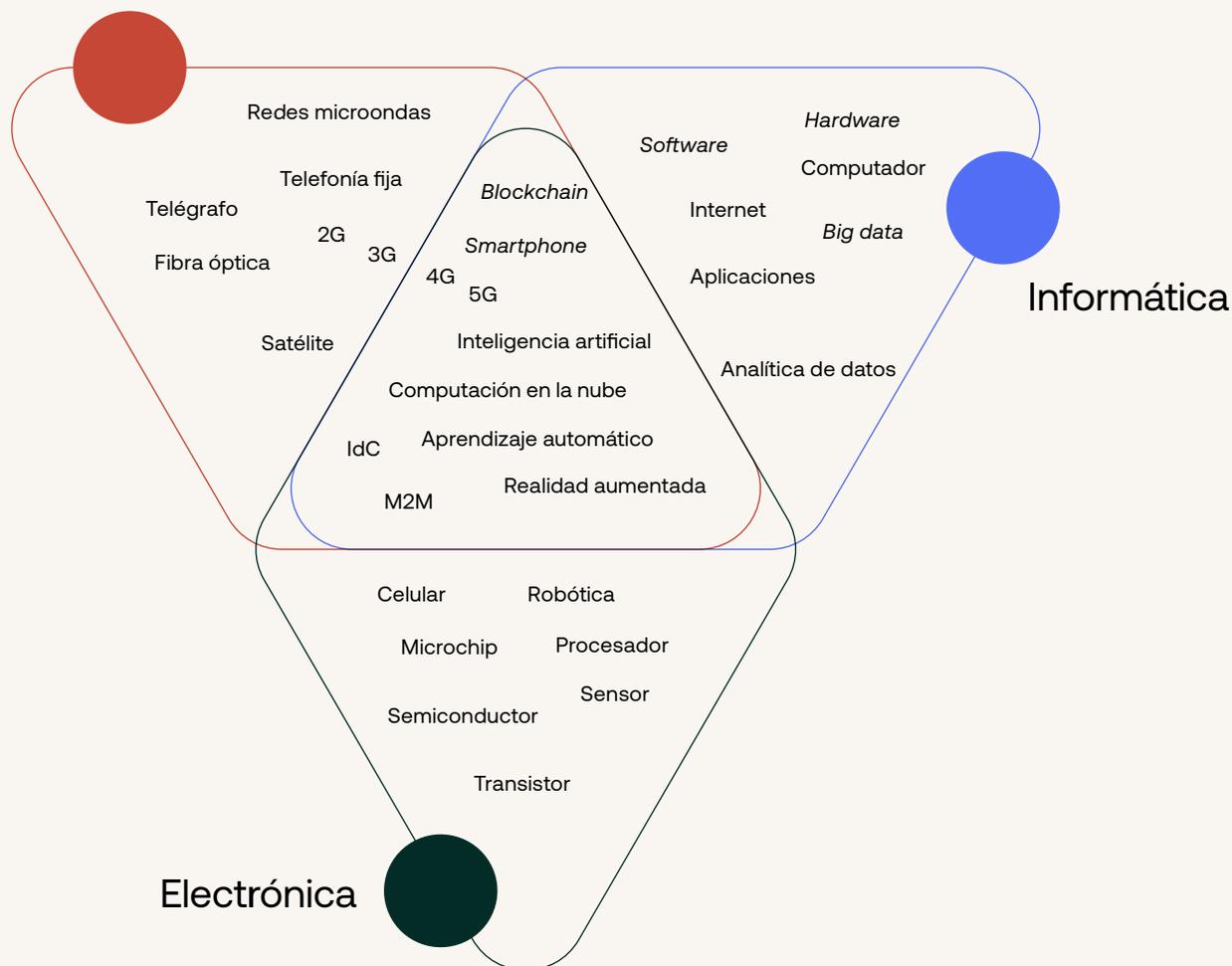
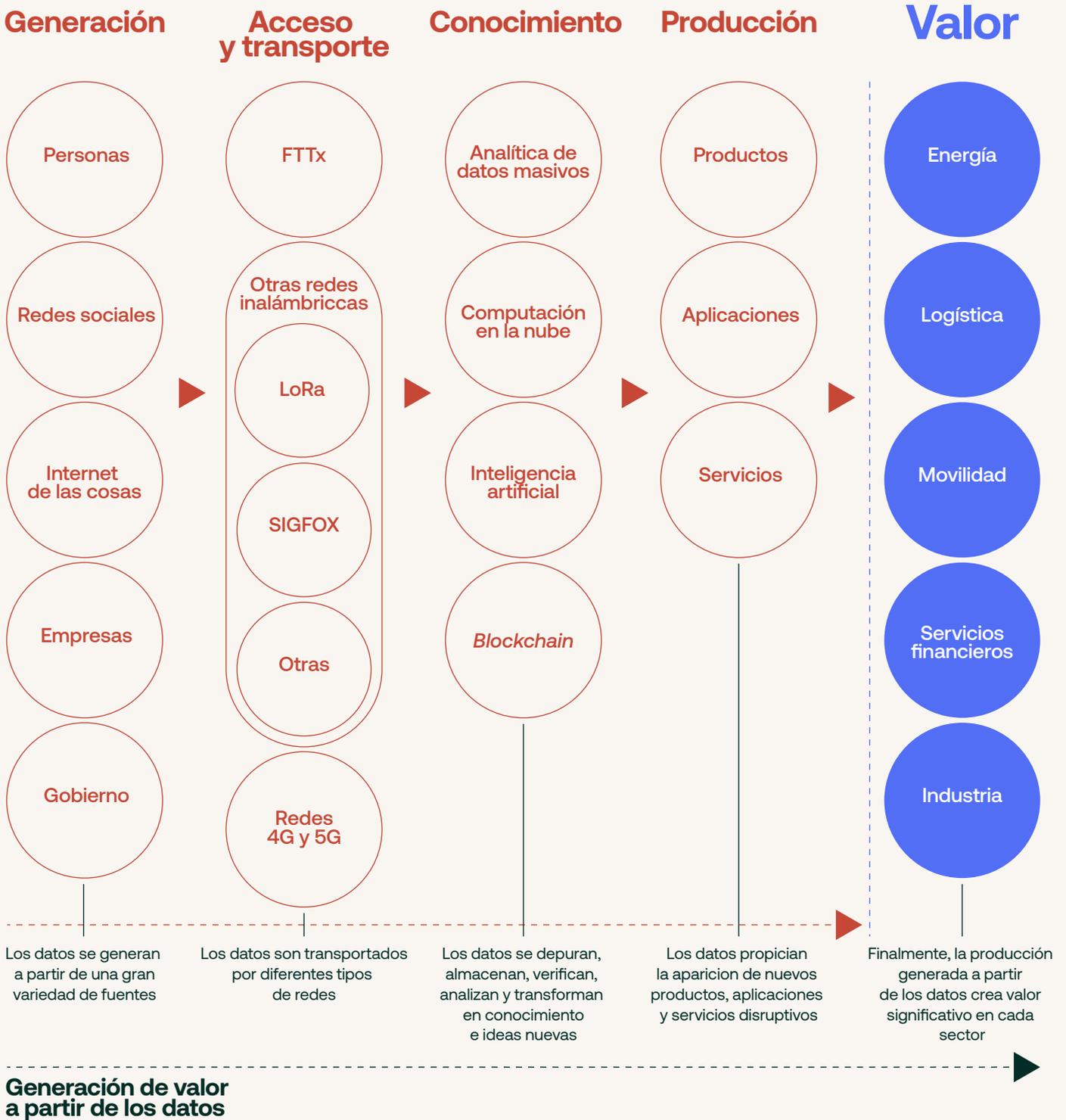


Figura 1 — La convergencia entre las industrias de telecomunicaciones, informática y electrónica y el surgimiento de las tecnologías de la Cuarta Revolución Industrial

Figura 2 — La creación de valor a partir de procesos de digitalización

Economía digital



analizados mediante diversas tecnologías (IA, computación en la nube, analítica de datos y cadena de bloques). De esta forma se transforman en conocimientos aplicados, ideas e inteligencia, que facilitan la toma de decisiones, optimizan los procesos y habilitan la creación de nuevos productos, aplicaciones y servicios, creando valor significativo en cada sector en el contexto de la economía digital, mejorando sus capacidades de planificación, gestión e innovación y traduciéndose en beneficios para los ciudadanos y la sociedad en general.

Esos datos representan en sí mismos un modelo del mundo que describen, informando de qué y dónde comprar o vender; cómo producir y transportar de manera eficiente; cómo mantener contacto con los clientes; y cuál es el estatus y la ubicación de las personas y cosas de interés. Además, permiten proveer capacidades analíticas acerca de las necesidades actuales y futuras que facilitarán la sostenibilidad y escalabilidad de los modelos de negocio, creando valor a partir de los procesos de digitalización.

Digitalización de infraestructuras en el sector eléctrico

Tradicionalmente la cadena de valor del sector eléctrico está compuesta por cuatro grandes eslabones asociados con las actividades clave de la prestación del servicio: la generación de electricidad, el transporte de electricidad a través de líneas de transmisión, la distribución a los usuarios finales y la comercialización, por la que se realizan transacciones de compra-venta de energía en el mercado mayorista para atender las necesidades de los usuarios finales (GEB, 2020). Bajo esta concepción, las tecnologías de la información y las

comunicaciones (TIC) principalmente se utilizaban como una herramienta de apoyo para la administración y operación de las redes eléctricas (IEA, 2017). Sin embargo, en las últimas décadas, las TIC no solo han ganado relevancia en la gestión, operación y mantenimiento de los sistemas eléctricos, sino que, combinadas con otros avances tecnológicos, han abierto nuevas posibilidades en materia de generación, distribución y comercialización de energía.

Tendencias de digitalización en el sector eléctrico

La implementación de tecnologías de medición inteligente y automatización de la red de distribución (AMI y ADA, por sus respectivas siglas en inglés) en la infraestructura impulsarán la transformación de las tradicionales redes eléctricas en redes inteligentes (*smart grids*). Esas tecnologías, a su vez, permitirán y promoverán el desarrollo de otras, como los recursos de energía distribuidos (DER) y los vehículos eléctricos (VE).

Todas ellas cambiarán tanto la cadena de valor del sector como el esquema a través del cual se presta tradicionalmente el servicio de energía eléctrica. En el primer caso, porque permitirá el surgimiento de nuevos modelos de negocio y la consecuente incorporación de nuevos actores; en el segundo, porque hará posible pasar de sistemas centralizados de generación, caracterizados por grandes plantas productoras

de energía, tales como hidroeléctricas o termoeléctricas, a sistemas de generación distribuida —constituidos por diversos tipos de equipos de pequeña capacidad, que pueden abastecer la demanda local al incorporar su generación a la red— permitiendo la desagregación de las redes. Igualmente, promoverán cambios en los hábitos de consumo de los usuarios del servicio eléctrico, lo que posibilitará el aplanamiento de la curva de demanda de energía, disminuyendo las inversiones que se realizan en el parque de generación de electricidad.

En el Cuadro 1 se presentan nuevos servicios derivados de la implementación de tecnologías avanzadas en el sector energético y los impactos esperados, los cuales actúan como motores para el desarrollo de esas herramientas.

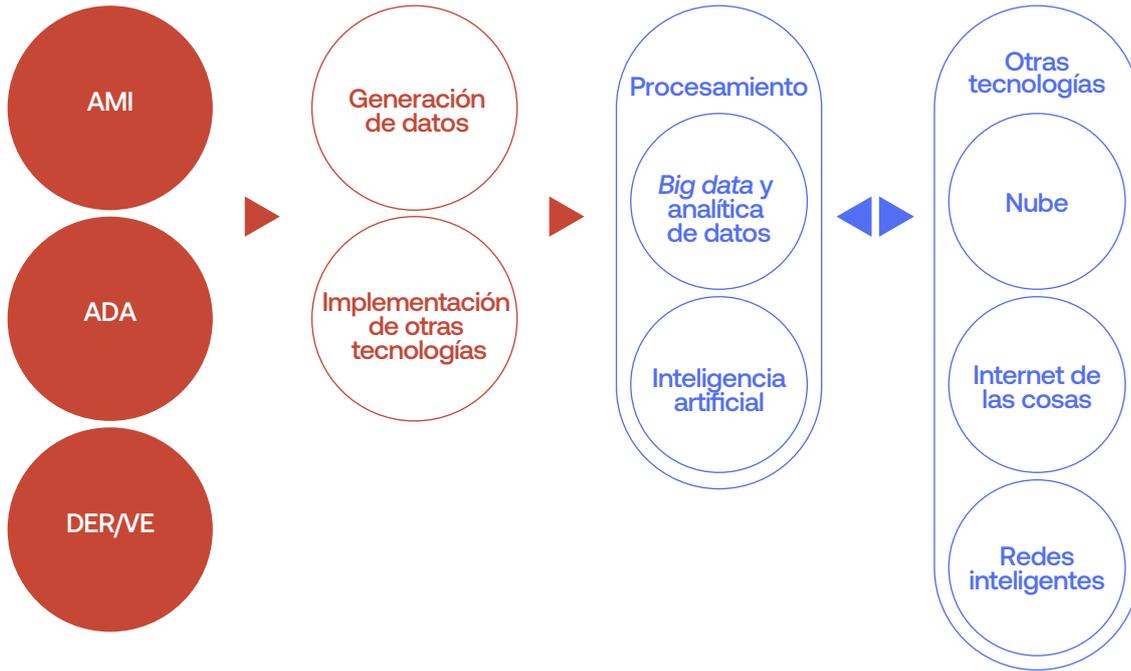
Cuadro 1 — Tecnología, nuevos negocios o servicios que promoverán la digitalización del sector eléctrico

Tecnología	Nuevos negocios o servicios	Impactos esperados
Infraestructura de medición inteligente (AMI)	<ul style="list-style-type: none"> – Lectura y control del consumo de energía eléctrica – Tarifas dinámicas – Alertas al usuario sobre el precio de la energía – Análisis de datos e información generada – Conexión y desconexión remota de circuitos 	<ul style="list-style-type: none"> – Uso eficiente de la energía – Aplanamiento de la curva de demanda de energía – Reducción del consumo pico de energía – Reducción de los costos de operación y mantenimiento – Definición del marco regulatorio para su implementación – Facilidad de acceso a las redes de telecomunicaciones
Automatización de la red de distribución (ADA)	<ul style="list-style-type: none"> – Conexión y desconexión remota de circuitos – Telecontrol de elementos del sistema eléctrico – Reconfiguración automática de la red – Análisis de datos e información generada 	<ul style="list-style-type: none"> – Aumento de la vida útil de los activos – Disminución de los costos de inversión (CAPEX) – Mejoramiento de la confiabilidad y resiliencia del sistema eléctrico – Facilidad de acceso a las redes de telecomunicaciones
Recursos de energía distribuidos (DER) y vehículos eléctricos (VE)	<ul style="list-style-type: none"> – Generación en las redes de distribución – Comercialización de excedentes de energía generada por los usuarios – Generadores virtuales de energía 	<ul style="list-style-type: none"> – Reducción de la huella de carbono – Definición del marco regulatorio para la comercialización de los excedentes de energía

Dependiendo del alcance y el nivel de sofisticación del proyecto, estas tecnologías también requerirán que el sector eléctrico utilice técnicas avanzadas para procesar y analizar la información recopilada. Entre ellas, están los datos masivos (*big data*) y la analítica de datos, la IA y la computación en la nube. A partir de estas, se podrán obtener resultados que permitirán evaluar el desempeño de las redes eléctricas y la toma de decisiones en tiempo real, así como mejorar la gestión, operación y mantenimiento de los administradores de las redes y la calidad de la prestación del servicio de electricidad y otros servicios conexos a los usuarios. Asimismo, facilitarán la implementación y despliegue de redes inteligentes y la introducción del internet de las cosas, lo que posibilita ofrecer servicios personalizados a los usuarios del servicio de energía eléctrica.

Figura 3 — Componentes de la digitalización en el sector de la energía

Digitalización del sector de energía



La importancia de la digitalización en el sector eléctrico

La digitalización de este sector permitirá obtener mejoras en el diseño y la planeación de las redes eléctricas (ver la Figura 4), así como en la operación y mantenimiento de los sistemas eléctricos, dando lugar a un nuevo concepto: las redes inteligentes. Estas tienen como objetivos lograr una disponibilidad constante de energía, garantizar la sostenibilidad energética y la protección ambiental, prevenir las fallas de gran escala del sistema eléctrico, optimizar los gastos operativos (OPEX) de producción, transmisión y

distribución de energía y disminuir los gastos de inversión (CAPEX) del sistema. Estos cambios no solo se dan a lo largo de toda la cadena de valor del sector (generación, transmisión, distribución y usuarios finales), sino que también la transforman al permitir el surgimiento de nuevos modelos de negocio y la consecuente incorporación de nuevos actores.

Figura 4 — Componentes para la mejora del diseño y la planeación de las redes eléctricas mediante la digitalización y el desarrollo de redes inteligentes



Principales hallazgos de las experiencias internacionales en el sector eléctrico

Las oportunidades de digitalización más notorias se concentran en tres grandes categorías: infraestructura de medición avanzada, automatización avanzada de la red de distribución

y recursos de energía distribuidos. El Cuadro 2 presenta un resumen de los principales hallazgos de las experiencias internacionales analizadas.

Cuadro 2 — Resumen de los principales hallazgos de las experiencias internacionales analizadas

Experiencia	Problema	Solución	Impacto	Eslabón de la cadena de valor
Estados Unidos Implementación de DER en el estado de California	Crisis energética en el año 2000 por problemas de suministro eléctrico	Liberalización del mercado energético y despliegue de sistemas de recursos de energía distribuidos	<ul style="list-style-type: none"> – Más de 800.000 usuarios con paneles solares – Penetración del 82 % de medidores inteligentes en el sector residencial – Implementación de fuentes de energía renovable, disminuyendo los niveles de dióxido de carbono (CO₂) 	<ul style="list-style-type: none"> – Generación – Comercialización de la energía
Reino Unido Establecimiento de infraestructura de datos y comunicaciones en el Programa de Implementación de Medidores Inteligentes	No se contaba con la infraestructura informática y de comunicaciones para la implementación de la medición inteligente del consumo de energía	Constitución de la Data Communications Company, empresa con una arquitectura centralizada para la gestión de la información del sistema, que es la encargada de controlar el flujo de información generado en los medidores inteligentes con los diferentes actores del sistema	<ul style="list-style-type: none"> – Definición del esquema de gobernanza de datos con el fin de salvaguardar la información de los usuarios y proteger su privacidad – Instalación de aproximadamente 21 millones de medidores inteligentes – En junio de 2020, se cursaron más de 161 millones de mensajes en la red – Definición de franjas horarias tarifarias 	<ul style="list-style-type: none"> – Distribución – Comercialización de la energía
Reino Unido Uso de inteligencia artificial (IA) en la gestión de energía de los edificios comerciales	Disminuir las emisiones de CO ₂ y el consumo de energía, generando condiciones ambientales que mejoren el bienestar y confort de los ciudadanos	Desarrollo de algoritmos de IA para predecir y optimizar el consumo energético de un edificio	<ul style="list-style-type: none"> – Aprovechamiento y optimización del uso de paneles solares en edificios comerciales – Análisis descriptivos y predicciones dinámicas del consumo y costo de la energía – Posibilidad de generar ingresos por la venta de excedentes de energía generada con los DER – Reducción de la huella de carbono 	<ul style="list-style-type: none"> – Distribución – Comercialización de la energía
Colombia Iniciativas sectoriales de redes inteligentes	Afrontar la transformación del sector eléctrico como consecuencia de la incorporación de las TIC en la cadena de valor del sector	Desarrollo del proyecto Colombia Inteligente para coordinar la búsqueda de soluciones tecnológicas en la cadena de valor del sector	<ul style="list-style-type: none"> – Se estima una reducción del 25 % de las pérdidas técnicas y del 8 % de las no técnicas – Se esperan mejoras en la continuidad del suministro – Se prevé una disminución de emisiones de CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> – Generación – Transmisión – Distribución – Comercialización de la energía
Chile Modernización del sector eléctrico	Diseño e implementación de la estrategia para modernizar el sector eléctrico en Chile	Elaboración de la Agenda Energética y los documentos «Ruta Energética 2018-2022» y «Hoja de Ruta 2050: hacia una energía sustentable e inclusiva para Chile» Definición del marco normativo	<ul style="list-style-type: none"> – Se realizó un amplio despliegue de medidores inteligentes – Adopción de la Norma de Protección de la Infraestructura Crítica (CIP, por sus siglas en inglés) de la North American Electric Reliability Corporation (NERC) para garantizar la seguridad informática 	<ul style="list-style-type: none"> – Distribución – Comercialización de la energía
Uruguay Iniciativas sectoriales de redes inteligentes	Aumentar la eficiencia energética del país	Implementación de una red inteligente y aumento del parque de fuentes alternativas de energía, mediante una estrategia de consumo basado en un sistema de demanda-respuesta	<ul style="list-style-type: none"> – Instalación de 252.000 medidores inteligentes – Utilización de las redes de comunicaciones del operador público ANTEL – Definición de planes para impulsar la generación de energía mediante fuentes eólicas – Mejoras en la facturación y definición de franjas tarifarias para usuarios residenciales 	<ul style="list-style-type: none"> – Generación – Distribución – Comercialización de la energía

Beneficios incrementales del componente de digitalización en el sector eléctrico

En el Cuadro 3 se resumen los principales beneficios económicos generados por el despliegue de redes inteligentes. En la primera columna se enuncia el beneficio, en la segunda

se describe brevemente su origen y en la tercera, la forma de valorar los efectos previstos en el análisis beneficio-costos.

Cuadro 3 — Beneficios económicos del despliegue de redes inteligentes

Beneficio	Descripción	Forma de valoración
Reducción en los cortes de suministro	Las redes inteligentes cuentan con equipos que permiten monitorear y regular los parámetros de la corriente y la condición de los equipos. En estas redes la incidencia de fallas es menor que en las tradicionales.	Se valora a partir de un parámetro que refleja la disponibilidad a ser compensado por reducir la exposición a cortes no programados del suministro eléctrico.
Reducción de pérdidas técnicas	La capacidad de monitoreo de los equipos en las redes eléctricas permite una mayor oportunidad para el mantenimiento preventivo, focalizado en el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés), lo que reduce las pérdidas técnicas.	El beneficio asociado con la reducción de pérdidas técnicas se valora al costo de la energía que se deja de producir a nivel mayorista.
Reducción de pérdidas no técnicas (negras)	El despliegue de medidores inteligentes permite implementar estrategias comerciales con esquemas de prepago.	El beneficio asociado con la recuperación de cartera se valora según el costo marginal de los fondos públicos.
Reducción del gasto operativo	El despliegue de medidores inteligentes reduce los costos comerciales en las áreas de lectura, cortes y reconexiones.	El beneficio económico se mide como los ahorros en costos de operación de la gestión comercial de las empresas.
Reducción en la necesidad de compra de energía reactiva para el control automático de la generación (CAG)	Algunos equipos de las redes inteligentes, como los convertidores en fuentes no convencionales, tienen la capacidad de aportar energía reactiva al sistema.	Estos beneficios se valoran por el costo de la energía reactiva.
Reducción del precio mayorista de la energía	La entrada de fuentes renovables embebidas en la red puede desplazar recursos de despacho centralizado de costos elevados.	El beneficio se estima como el menor costo de generación en el mercado mayorista.
Reducción de costos de congestión y restricciones de transporte	La generación distribuida con fuentes como la red solar puede reducir la distancia entre los puntos de generación y los de consumo.	Este beneficio se puede estimar como la reducción en el valor presente neto del plan de expansión de las redes de transporte.
Ahorros percibidos por los usuarios en sus facturas	Si se despliegan medidores inteligentes con tarifas dinámicas, los usuarios pueden desplazar sus consumos a horarios con menores costos de energía.	Los beneficios corresponden a la diferencia en el costo de la energía en las situaciones con proyecto y sin él.
Desplazamiento de inversiones en generación	La entrada de fuentes no convencionales descentralizadas en la red aumenta la capacidad del sistema y con ello desplaza hacia el futuro la necesidad de ingresar recursos convencionales adicionales en el parque de generación.	Los beneficios se estiman como la reducción en el valor presente neto del plan de expansión en generación.
Desplazamiento de inversiones en distribución y transporte y reducción en costos de mantenimiento	La generación distribuida acorta las distancias entre las fuentes de generación y los puntos de consumo y, por lo tanto, reduce los flujos de energía eléctrica en las redes de distribución y transporte.	Los beneficios se estiman como la reducción en el valor presente neto del plan de expansión en transporte.
Reducción de emisiones de gases efecto invernadero (GEI)	La entrada de los recursos descentralizados desplaza otras fuentes, algunas de ellas basadas en combustibles fósiles, como el diésel, el carbón o el gas natural, que emiten CO ₂ a la atmósfera, uno de los principales gases de efecto invernadero.	La reducción de gases de efecto invernadero se valora con el precio que asigna el mercado internacional a los bonos de reducción de carbono.

Incentivos y barreras para la digitalización del sector eléctrico

La evolución del sector eléctrico depende, en buena medida, de las reformas regulatorias que promuevan o inhiban la introducción del cambio técnico. La digitalización y la expansión de fuentes de generación descentralizada de menor escala embebida en la red de distribución dependen de la estructuración del mercado y de los incentivos regulatorios y económicos que existan.

Los recursos descentralizados de fuentes no convencionales son por naturaleza intermitentes, y no es posible programar su despacho como se hace con las plantas tradicionales que alimentan la red. Estos recursos aportan electricidad al sistema en función de la radiación y el viento, sin considerar el nivel de la demanda ni las decisiones administrativas. Las tecnologías de las redes inteligentes permiten estabilizar las condiciones de operación de la red en presencia de generación descentralizada, pero exigen algunas condiciones técnicas.

En particular, es necesario asegurarse de que los circuitos en donde se incorporan DER tengan la capacidad para recibirlos. En los países donde ya se ha establecido un marco regulatorio para la operación de este tipo de activos de generación, se han adoptado diferentes medidas para regular su entrada. En general, se obliga al operador de la red a publicar información técnica y de demanda de cada circuito, de forma que quien quiera instalar su generador pueda verificar previamente y sin requerir autorizaciones³ si la red tiene la capacidad suficiente para recibir la energía proveniente de DER. De esta forma los usuarios puedan estructurar sus proyectos de autogeneración atendiendo los requisitos para la conexión. En la literatura revisada se identificaron dos tipos de restricciones:

- La generación entregada en el punto no puede exceder un porcentaje de la demanda en hora de menor consumo.
- La generación entregada no puede exceder un porcentaje de la carga máxima del circuito.

Otra decisión técnica decisiva para la penetración de las tecnologías digitales es el acceso del sistema eléctrico a redes de comunicación. El despliegue de una red inteligente exige la comunicación de millones de equipos en tiempo real. La eficiencia de la digitalización dependerá de la regulación

que se aplique a los operadores de la red para asegurar la conectividad de sus equipos (acceso al espectro radioeléctrico, por ejemplo).

También es necesario contemplar los incentivos económicos de los agentes involucrados. Para el operador de la red, la introducción de recursos de energía distribuidos puede significar pérdidas económicas. En efecto, la energía generada por sus clientes reduce su facturación y con ello los ingresos destinados a cubrir costos fijos (no evitables) de transmisión y distribución⁴; por su parte, para el usuario, la remuneración de sus excedentes de generación puede viabilizar financieramente el proyecto de autogeneración. Es por esta razón que la regulación que se adopte para remunerar los excedentes de energía entregada por los DER es determinante en la expansión de las redes inteligentes y la generación descentralizada. Una revisión de la experiencia internacional muestra que se han adoptado distintos esquemas regulatorios para remunerar los excedentes de energía proveniente de recursos descentralizados y la asignación de pérdidas.

Otro tópico esencial en la regulación para la expansión de redes inteligentes es la determinación de quién debe cubrir los costos de los medidores inteligentes. En algunos países el costo se trasfiere al usuario. Este esquema puede generar conflictos, sobre todo en segmentos de población de bajos ingresos que no tienen capacidad para asumir el gasto. Por otra parte, la empresa de distribución, con el despliegue de las AMI, puede reducir costos de lectura, facturación y recaudo, que, por vía regulatoria, se deberían reflejar en menores tarifas. En el otro extremo, un esquema que exija a las empresas asumir los costos de las AMI sin un ajuste correspondiente en la tarifa podría ser expropiatorio y comprometer la sostenibilidad financiera del prestador del servicio y la credibilidad regulatoria.

Para explotar completamente los beneficios de la digitalización de las redes eléctricas es necesario establecer reglas para que las transacciones del mercado mayorista tengan una definición horaria de precios y que los usuarios finales reciban esta señal. Por ejemplo, la rentabilidad privada y el ritmo de penetración de los vehículos eléctricos van a ser mayores si el usuario percibe una señal de precios bajos del mercado en horas nocturnas de menor demanda, cuando su vehículo está cargando. Con

³ En países como Colombia, el nuevo generador debe tener permiso de conexión y suscribir un contrato con el operador de la red a la cual se conectará el activo.

⁴ La compra de energía, en contraste, es un costo evitable. Si los usuarios demandan menos de la red, el operador adquiere menos energía en el mercado mayorista.

la estructura de precios actual, la carga de baterías se liquida al precio promedio, muy por encima del costo marginal de generación del mercado en ese horario.

Otro de los aspectos a tener en cuenta es la definición de aspectos regulatorios, en particular los relativos a la operación y estandarización de los equipos que se utilizarán, así como sobre la gobernanza y privacidad de los datos generados por las redes inteligentes.

Finalmente, es importante tener presente que algunos de los beneficios de las redes eléctricas están constituidos por reducción de externalidades, como la contaminación y emisión de gases de efecto invernadero. En estos casos, es eficiente en términos económicos establecer incentivos que permitan internalizar en los agentes los efectos externos de sus decisiones. Algún nivel de exención tributaria en la compra de estos equipos podría justificarse en el plano de la eficiencia económica.

Digitalización de infraestructuras en el sector de la movilidad

Los crecientes niveles de congestión vehicular y de los índices de contaminación ambiental en las ciudades se han traducido en un deterioro de la calidad de vida de sus habitantes. Entre las alternativas para abordar esta problemática se encuentra la digitalización de los sistemas de movilidad. Esta solución ofrece

la oportunidad de mejorar la eficiencia de los sistemas de transporte, con un consiguiente impacto económico y social, y de apoyar la toma de decisiones de los usuarios, entre otras ventajas.

Tendencias de digitalización en el sector de la movilidad

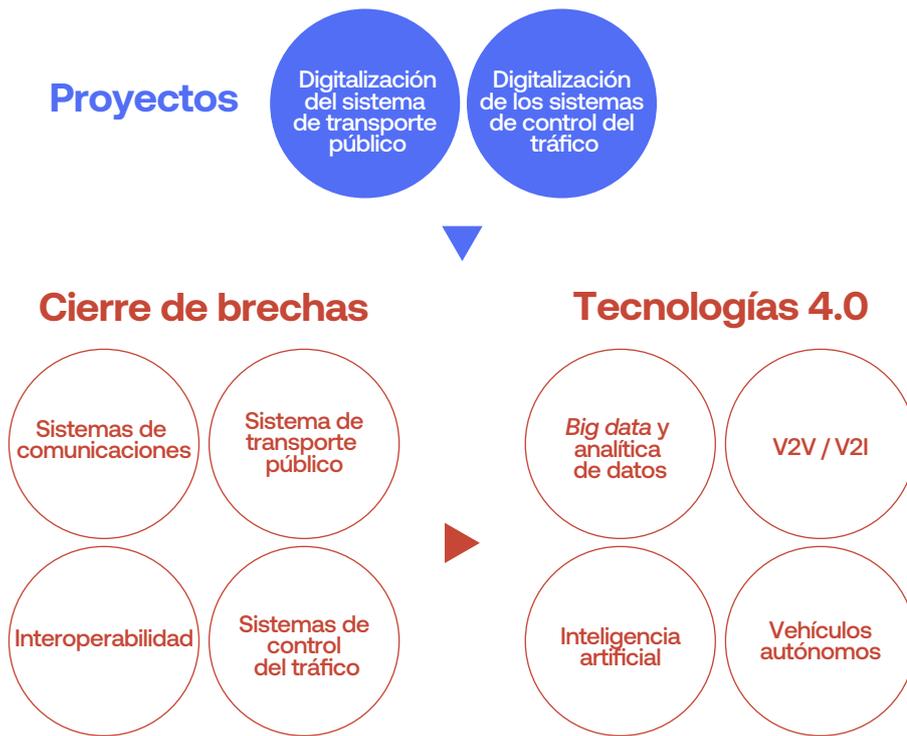
El desarrollo y la masificación de tecnologías que facilitan la digitalización del sistema de transporte promueven sistemas de transporte inteligentes (STI). Estos incentivan la formulación de nuevos proyectos e iniciativas encaminadas a mejorar el funcionamiento y la operación del sistema de transporte primordialmente en dos componentes: por un lado, la digitalización de los sistemas de control del recaudo, la facturación y el control de la flota, y, por el otro, la digitalización de los sistemas de control del tráfico y de comunicación entre vehículos y de estos con la infraestructura (V2V y V2I, por sus respectivas siglas en inglés), como se muestra en el Cuadro 4.

Estas tecnologías, dependiendo del alcance y el nivel de sofisticación del proyecto, también requieren el uso de técnicas avanzadas para procesar y analizar la información recopilada, tales como el *big data*, la analítica de datos, la IA y la computación en la nube. A partir de ellas se pueden obtener resultados que permiten, por ejemplo, evaluar y mitigar los riesgos existentes en las vías para prevenir accidentes y tomar decisiones en tiempo real sobre los dispositivos de control del tráfico que mejoren el flujo vehicular y optimicen los sistemas de transporte público. Así mismo, facilitan la implementación y despliegue de tecnologías emergentes, tales como sistemas de conducción autónoma y de reconocimiento facial, útil para la prevención de fraudes y para mejorar la seguridad del sistema de transporte público, entre otras aplicaciones.

Cuadro 4 — Tecnología, nuevos negocios o servicios que promoverán la digitalización del sector de la movilidad

Tecnología	Nuevos negocios o servicios	Impactos esperados
Control del recaudo y la facturación del sistema de transporte público	<ul style="list-style-type: none"> – Control de entrada y salida de los usuarios – Validación de los medios de pago – Localización de vehículos – Aplicaciones de micromovilidad compartida y aplicaciones de movilidad como servicio (MaaS, por sus siglas en inglés) 	<ul style="list-style-type: none"> – Reducción de fraudes – Disminución de tiempos de abordaje – Integración modal del transporte público – Facilidad de acceso a redes de telecomunicaciones
Control de la flota de transporte público	<ul style="list-style-type: none"> – Control del flujo de velocidad – Localización de vehículos – Información al usuario – Aplicaciones de micromovilidad compartida y de movilidad como servicio (MaaS) – Sistemas de ayuda a la operación de la flota 	<ul style="list-style-type: none"> – Reducción de la huella de carbono – Reducción de los costos de operación – Optimización de rutas – Integración modal del transporte público – Facilidad de acceso a redes de telecomunicaciones – Aumento de la calidad del servicio y mejora de la percepción por parte del usuario
Sistemas de control del tráfico	<ul style="list-style-type: none"> – Políticas de prioridad de tránsito (vehículos de transporte masivo, atención de emergencias, protección ciudadana, etc.) – Control del flujo de velocidad – Peajes electrónicos – Generación de alertas para la prevención de accidentes – Aplicaciones de micromovilidad compartida y movilidad como servicio (MaaS) – Captura y análisis de datos para la planificación del transporte 	<ul style="list-style-type: none"> – Reducción de la accidentalidad – Disminución de los tiempos de desplazamiento – Disminución de la congestión vehicular – Reducción de la huella de carbono – Estandarización de tecnologías
Comunicación entre vehículos (V2V) y entre vehículos e Infraestructura (V2I)	<ul style="list-style-type: none"> – Control del flujo de velocidad – Políticas de prioridad del tránsito (vehículos de transporte masivo, atención de emergencias, protección ciudadana, etc.) – Peajes electrónicos – Cargos por congestión o contaminación – Localización de vehículos – Generación de alertas para la prevención de accidentes – Vehículos autónomos 	<ul style="list-style-type: none"> – Reducción de accidentalidad – Disminución de los tiempos de desplazamiento – Disminución de la congestión vehicular – Reducción de la huella de carbono – Estandarización de tecnologías – Disuasión del incumplimiento de las normas de tránsito – Reducción de los costos de operación del sistema de transporte público – Facilidad de acceso a redes de telecomunicaciones

Figura 5 — Digitalización de la infraestructura del sector de la movilidad para el cierre de brechas y la adopción de nuevas tecnologías



La importancia de la digitalización en el sector de la movilidad

La digitalización de los sistemas de movilidad ofrece la oportunidad de optimizar la eficiencia de los sistemas de transporte al suministrar información útil para la planificación y manejo de las vías. Mediante esa tecnología, se generan datos cuyo procesamiento y análisis permiten gestionar mejor el flujo del tráfico, identificar incidencias viales y realizar diagnósticos sobre el estado de las vías. Con la digitalización de la infraestructura de movilidad, se logran no solo beneficios económicos, sino también ambientales y en materia de seguridad vial, entre otros.

En lo que respecta al usuario, esos datos proporcionan la información necesaria para planificar sus desplazamientos y tomar decisiones, por ejemplo, para reducir los tiempos de sus trayectos (ver la Figura 6).

Figura 6 — Componentes para la mejora de la planeación y gestión de sistemas de movilidad mediante la digitalización y la creación de sistemas de transporte inteligentes



Principales hallazgos de las experiencias internacionales en el sector de la movilidad

Las oportunidades más notorias se concentran en dos grandes categorías: digitalización de los sistemas de transporte público y digitalización de los sistemas de control del tráfico. El Cuadro

5 presenta un resumen de los principales hallazgos de las experiencias internacionales analizadas.

Cuadro 5 — Resumen de los principales hallazgos de las experiencias internacionales analizadas

Experiencia	Problema	Solución	Impacto	Eslabón de la cadena de valor
Singapur Digitalización del sistema de transporte público	Alta demanda de los desplazamientos y restricciones de crecimiento de la red vial	Desarrollo de un sistema inteligente mediante sistemas de control, monitoreo y vigilancia, gestión de la información y recaudo	<ul style="list-style-type: none"> – Sistema de control para gestionar el flujo del tráfico, el cumplimiento de las normas de tránsito y la seguridad en vías e intersecciones mediante semáforos inteligentes y sistemas de señalización dinámica – Sistemas de recaudo para procesar transacciones en peajes, transporte público y parqueaderos – Sistemas de vigilancia para verificar el cumplimiento de las normas de tráfico 	<ul style="list-style-type: none"> – Usuarios del sistema de transporte público y vehículos particulares – Operadores del sistema de transporte público – Fabricantes de vehículos – Fabricantes de sistemas de control del tránsito – Fabricantes de sistemas de señalización del tráfico
Finlandia Movilidad como servicio (MaaS)	Crecimiento del número de vehículos, incremento en los niveles de congestión y en los índices de contaminación ambiental	Desincentivar el uso del vehículo privado mediante la aplicación de planeación del viaje a través de modos alternativos	<ul style="list-style-type: none"> – Integración de servicios de transporte públicos y privados y de medios individuales y colectivos – Planeación del viaje considerando las condiciones del tráfico y las preferencias de los usuarios – Gestión de la reserva y compra de boletos electrónicos para diferentes modos de transporte 	<ul style="list-style-type: none"> – Usuarios del sistema de transporte público – Operadores del sistema de transporte público – Usuarios de vehículos de transporte particular
Suecia Implementación de cargos por congestión en Estocolmo	Crecimiento del tráfico en el centro de la ciudad, causando altos niveles de congestión	Cobro de peaje al ingresar o salir del centro de la ciudad con el fin de desincentivar el uso del vehículo particular	<ul style="list-style-type: none"> – Disminución del tráfico vehicular – Reducción de los tiempos de viaje – Reducción de la huella de carbono – Disminución de la accidentalidad 	<ul style="list-style-type: none"> – Usuarios del sistema de transporte público y de vehículos particulares – Operadores del sistema de transporte público – Fabricantes del sistemas de control del tránsito y de vehículos
Chile Digitalización en la integración del sistema de transporte público de Santiago	Sistema de transporte público ineficiente y congestionado, con largos recorridos, tiempos de viaje largos y recolección del pago por el conductor	Implementación de un sistema de transporte integrado multimodal con buses equipados con GPS y sistemas electrónicos de pago	<ul style="list-style-type: none"> – Implementación del sistema electrónico de pago de pasajes (SEPP) de diferentes modos de transporte con una tarifa integral – Recopilación de datos para realizar estudios de rutas origen-destino, calidad del servicio, velocidad de los buses, seguridad del medio de pago 	<ul style="list-style-type: none"> – Usuarios del sistema de transporte público – Operadores del sistema de transporte público
Argentina Análisis de la movilidad en la provincia de Neuquén	Elaboración de modelos de estimación de la demanda de transporte para hacer frente a las altas tasas de crecimiento poblacional	Uso de herramientas de <i>big data</i> y analítica de datos para estudiar la movilidad a partir de la información proveniente de los teléfonos móviles	<ul style="list-style-type: none"> – Análisis de los registros de actividad de los teléfonos móviles (huella digital) – Elaboración de patrones de movilidad y matrices de origen-destino, tanto totales como por franjas horarias 	<ul style="list-style-type: none"> – Usuarios del sistema de transporte público – Operadores del sistema de transporte público – Operadores de redes de telecomunicaciones
Brasil Digitalización del Metro de São Paulo	Mejorar la operación optimizando el consumo de energía y minimizando el fraude asociado al pago de billetes	Instalación de un sistema para el monitoreo de personas y de reconocimiento facial	<ul style="list-style-type: none"> – Se espera la reducción de la criminalidad – Se espera ahorrar el 30 % en el costo de energía consumida 	<ul style="list-style-type: none"> – Usuarios del sistema de transporte público – Operadores del sistema de transporte público

Beneficios incrementales del componente de digitalización en el sector de la movilidad

En el Cuadro 6 se resumen los principales beneficios económicos de la digitalización de los vehículos y la infraestructura vial. En la primera columna se enuncia el

beneficio, en la segunda se describe brevemente su origen y en la tercera, la forma de valorar los efectos previstos en el análisis beneficio-costos.

Cuadro 6 — Beneficios económicos de la digitalización de la infraestructura vial y los vehículos

Beneficio	Descripción	Forma de valoración
Reducción de los tiempos de viaje	La digitalización en el sector de la movilidad actúa sobre la velocidad de circulación y los tiempos de viaje de la ciudadanía por dos vías: control del viaje y señal de precios (peajes urbanos, cargos por congestión o contaminación).	Se estima la diferencia entre el tiempo de viaje en las situaciones con proyecto y sin él, y se valora su costo de oportunidad (ingresos laborales promedio de acuerdo con las encuestas de hogares).
Reducción de los costos de operación de los vehículos	El aumento en la velocidad reduce los costos de operación de los vehículos, particularmente el consumo de combustible.	Existen modelos que permiten estimar los costos de operación vehicular ante diferentes condiciones de circulación, incluida la velocidad.
Reducción de la emisión de contaminantes	El aumento en la velocidad de circulación de los vehículos reduce el consumo de combustibles fósiles y con ello la emisión de contaminantes al aire.	La reducción de gases de efecto invernadero se valora con el precio que asigna el mercado internacional a los bonos de reducción de carbono. En áreas urbanas se debe considerar la reducción de externalidades por la menor emisión del material particulado.
Reducción de la accidentalidad	La digitalización en los equipos de los vehículos y en la infraestructura vial permiten anticipar situaciones de riesgo y actuar automáticamente para evitarlas.	Los beneficios económicos asociados con la reducción de la accidentalidad se valoran considerando el lucro cesante de los fallecimientos evitados, los ahorros en gastos de atención médica e incapacidad laboral en el caso de los heridos y los daños materiales.
Optimización de la operación del transporte público	Los dispositivos digitales para monitorear las condiciones de las vías en tiempo real aportan información sobre el tráfico y la demanda para alimentar la programación de los despachos de buses y optimizar el servicio en un corredor.	Los beneficios económicos se valoran como la reducción en los costos de operación y en el dimensionamiento de la flota necesaria para atender la demanda.
Reducción de los costos asociados con el recaudo en el transporte público	La digitalización permite reducir los costos del recaudo en el transporte público al permitir el pago del servicio con tarjetas magnéticas u otros medios digitales. También reduce los costos de manejo de efectivo y de administración de los fondos.	Se estima el diferencial entre el sistema tradicional de recaudo y el digital.
Mayor seguridad en el transporte público	El monitoreo en tiempo real de los vehículos y pasajeros, mediante cámaras de vigilancia y sistemas de alarma conectados directamente a los operadores del sistema y las autoridades, disuade los comportamientos criminales.	Los beneficios económicos asociados con la reducción de la criminalidad se valoran considerando el lucro cesante de los homicidios evitados, los ahorros en gastos de atención médica e incapacidad laboral en el caso de los heridos en atracos y las pérdidas materiales por robo.
Planeación de la infraestructura	La información en tiempo real del flujo vehicular y la capacidad en cada sector de la malla vial permite alimentar los modelos de transporte para identificar cuellos de botella y priorizar inversiones.	Los beneficios pueden ser enormes porque se concentran los recursos públicos en las inversiones prioritarias.

Incentivos y barreras para la digitalización en el sector de la movilidad

Los avances tecnológicos en la digitalización de la infraestructura de movilidad tienen un impacto significativo en términos económicos y de calidad de vida. Los gobiernos, la academia y los fabricantes de autos (y de equipos de conectividad) en Estados Unidos, Europa y Asia trabajan para unificar protocolos y tecnologías dirigidos a optimizar la forma en que los vehículos se comunican con la infraestructura y entre sí. Las tecnologías más avanzadas de automóviles autónomos y drones solo se empezarán a desplegar en Latinoamérica una vez que hayan madurado en los países desarrollados.

Mientras esto ocurre, la región debe hacer esfuerzos para cerrar las brechas existentes en materia de digitalización del sector de la movilidad. Desde el punto de vista técnico, es imperativo adoptar protocolos que aseguren la interoperabilidad de los equipos en redes viales de diferentes jerarquías y entidades responsables del tránsito y la infraestructura vial en cada localidad. Idealmente, los países deben contar con un protocolo único que permita a un vehículo pagar los peajes o cargos de congestión o contaminación sin detenerse y en cualquier segmento de la red vial. La digitalización ofrece soluciones tecnológicas ya ensayadas para identificar a los automóviles en movimiento y continuar el proceso electrónico de liquidación y recaudo.

En paralelo es importante avanzar en la estructuración de marcos normativos que permitan el cobro a los usuarios por el uso de las vías. La literatura económica muestra que, tanto desde el punto de vista del fisco como de los usuarios, lo mejor es cobrar a los usuarios cargos que aseguren la financiación del mantenimiento de la red. En áreas urbanas congestionadas, como se discutió, es óptimo disuadir del uso de vehículos motorizados mediante el cobro de una tarifa. La norma debe permitir a las autoridades implementar estos sistemas de cobro, condicionados a la realización de estudios técnico-jurídicos y económicos que muestren la bondad de la medida, los niveles tarifarios y las reglas para la aplicación de los recursos. Se debe hacer un esfuerzo importante de convencimiento para que la ciudadanía acoja positivamente las medidas. Las evaluaciones ex post en lugares donde se han implementado estos mecanismos muestran un apoyo mayoritario por parte de la población.

También es importante regular el manejo de la información de cámaras y sistemas digitales para disuadir del incumplimiento de las normas y controlar los flujos vehiculares. Los protocolos

y normas que armonicen la entrada de estas tecnologías pueden tener efectos positivos en su ritmo de expansión.

El sector público en diferentes niveles de gobierno se debe ocupar de modernizar los sistemas de control y gestión de las flotas de transporte público, de forma que se desplieguen las tecnologías digitales en los procesos de gestión de despachos, vigilancia en buses y estaciones, pago electrónico y telemetría para el control de velocidad, entre otras aplicaciones. La adopción de nuevas tecnologías puede enfrentar rigideces contractuales con concesionarios del servicio o el recaudo.

Finalmente, se deben incluir en la agenda todas aquellas acciones regulatorias que faciliten la formación de empresas orientadas a ofrecer, mediante plataformas digitales, servicios compartidos de movilidad en las áreas urbanas. Las normas se deben asegurar de la conformación de una industria eficiente y competitiva con el fin de favorecer un aprovechamiento del espacio público dinámico y en armonía con diversos usos.

Digitalización de infraestructuras en el sector de la logística

La cadena de valor del sector logístico comprende nueve tipos de procesos realizados por las empresas de este sector: embalaje, manejo de carga y descarga, transporte, almacenamiento, distribución, colaboración masiva (*crowdsourcing*), impresión 3D, plataformas transfronterizas y

gestión de la información. Todos estos elementos de la cadena de valor logística están experimentando transformaciones debido al cambio tecnológico y la combinación de la logística “tradicional” con innovaciones y aplicaciones agregadas por sistemas ciberfísicos.

Tendencias de digitalización en el sector de la logística

En el sector se ha iniciado un uso extensivo de sensores y dispositivos de seguimiento que utilizan tecnologías avanzadas, como el IdC, los sistemas de identificación por radiofrecuencia y de posicionamiento global, así como las comunicaciones dedicadas de corto alcance y reconocimiento automático del número de matrícula (conocidos también por sus respectivas siglas en inglés: RFID, GPS, DSRC y ANPR). Esas tecnologías permiten a los diferentes actores que intervienen en la cadena de valor de este sector la detección e identificación de patrones que mejoran la eficiencia de los diferentes procesos llevados a cabo en los distintos eslabones de la cadena.

También se está implementando la robótica y la realidad aumentada, con lo que se podrá incrementar la velocidad y mejorar la eficiencia y la precisión de las operaciones de preparación de pedidos.

La digitalización de las carreteras y la inclusión de sistemas inteligentes de transporte (SIT) han facilitado la coordinación de las operaciones de los transportistas al mitigar los riesgos asociados con el traslado de las mercancías y mejorar la confiabilidad de los tiempos de entrega. Además, han posibilitado la introducción en el futuro de vehículos de conducción autónoma. Adicionalmente, la incorporación de robots (droides) y drones en la entrega de los productos

a los clientes finales podría traducirse en ahorros en los costos en las cadenas de suministro.

La impresión tridimensional (3D) podría tener impactos en las cadenas de suministro y la fabricación, al facilitar la producción fuera de las plantas tradicionales, reducir los trayectos en el transporte de mercancías y permitir la personalización de los productos de acuerdo con las características y necesidades de los clientes finales.

Por último, la cadena de bloques podría tener un gran impacto sobre el sector logístico teniendo en cuenta que, a partir de sus características de descentralización y criptografía, se pueden utilizar en diferentes procesos, como el seguimiento y legalización de las mercancías, la suscripción de contratos inteligentes y la validación de identidades digitales, entre otros.

Cuadro 7 — Tecnología, nuevos negocios o servicios que promoverán la digitalización del sector de la logística

Tecnología	Nuevos negocios o servicios	Impactos esperados
Sistemas inteligentes de transporte y comunicación entre vehículos (V2V) y entre estos y la infraestructura (V2I)	<ul style="list-style-type: none"> – Control del flujo de velocidad – Peajes electrónicos en corredores logísticos – Generación de alertas para la prevención de accidentes – Control de rutas – Control y trazabilidad de recursos (cargas, mercancías y personas) – Control de llegada y salida de modos de transporte (drones, trenes, camiones, aviones, barcos, etc.) – Vehículos autónomos (drones, trenes, camiones, aviones, barcos, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> – Reducción de la accidentalidad – Disminución de la congestión vehicular – Reducción de la huella de carbono – Estandarización de las tecnologías – Reducción de los costos de operación logística – Facilidad de acceso a redes de telecomunicaciones
IdC, identificadores digitales y sensores	<ul style="list-style-type: none"> – Trazabilidad de las cargas y las mercancías a lo largo de toda la cadena logística – Automatización de procesos – Automatización de bodegas – Puertos inteligentes (<i>smart ports</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> – Facilidad de acceso a las redes de telecomunicaciones – Mitigación de riesgos asociados al traslado de cargas – Reducción de la variabilidad en los tiempo de entrega
Plataformas digitales	<ul style="list-style-type: none"> – Colaboración masiva (<i>crowdsourcing</i>) y plataformas de compartición aplicadas a diversos activos, como bodegas y vehículos 	<ul style="list-style-type: none"> – Uso más eficiente de la capacidad disponible – Establecimiento de modelos de negocio que utilizan menos activos físicos – Acceso a un mercado mayor para las empresas logísticas pequeñas y medianas
Automatización	<ul style="list-style-type: none"> – Automatización de procesos – Automatización de bodegas – Puertos inteligentes (<i>smart ports</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> – Reducción de costos de operación logística
Impresión 3D	<ul style="list-style-type: none"> – Producción descentralizada 	<ul style="list-style-type: none"> – Reducción de costos de operación logística
Cadena de bloques (<i>blockchain</i>)	<ul style="list-style-type: none"> – Desintermediación financiera – Despacho y gestión aduanera – Digitalización de documentos – Contratos electrónicos – Transacciones digitales – Trazabilidad de las cadenas de producción y de suministro 	<ul style="list-style-type: none"> – Formalidad de la actividad logística

La digitalización y las diversas tecnologías implementadas en el sector logístico generan una gran cantidad de datos. Para aprovechar su potencial, se requerirán técnicas avanzadas, como el *big data*, analítica de datos, IA y computación en la nube, que permitan procesar, analizar y compartir en tiempo real la información recopilada a fin de mejorar la eficiencia de los procesos que se llevan a cabo en los diferentes eslabones del sector logístico.

Figura 7 — Componentes de la digitalización en el sector logístico

Digitalización del sector logístico

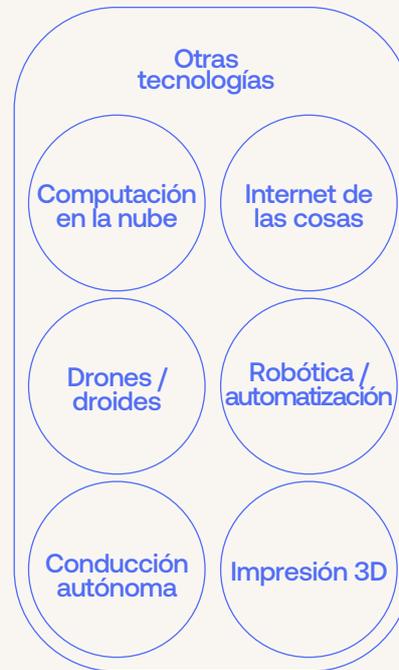


Generación de datos



Tecnologías 4.0

Implementación de nuevas tecnologías



La importancia de la digitalización en el sector de la logística

La transformación por la que están pasando los diferentes elementos de la cadena de valor logística ha implicado el surgimiento del término “logística 4.0”. Con él se hace referencia a la combinación del uso de la logística con las innovaciones y aplicaciones agregadas por sistemas ciberfísicos⁵. La logística 4.0 está relacionada con productos y servicios inteligentes

que pueden realizar tareas que normalmente hacían personas. Además, posibilitan la delegación de actividades para que los empleados puedan concentrarse en las tareas que necesitan más inteligencia que la provista por procesos automáticos o la que brindaría un simple producto o servicio inteligente (Barreto et al., 2017).

Figura 8 — Componentes para la mejora de la planeación y gestión de los sistemas logísticos mediante la digitalización de infraestructuras y la logística 4.0



⁵ Son sistemas físicos cuyas operaciones pueden ser monitoreadas, coordinadas, controladas e integradas por un sistema informático y de comunicaciones.

Principales hallazgos de las experiencias internacionales en el sector de la logística

Las oportunidades más notorias se concentran en la digitalización de los puertos inteligentes (*smart ports*), la optimización de las entregas a los clientes finales (última milla),

la digitalización de procesos aduaneros y la digitalización de los corredores logísticos. Los principales hallazgos se presentan en el Cuadro 8.

Cuadro 8 — Resumen de los principales hallazgos de las experiencias internacionales analizadas

Experiencia	Problema	Solución	Impacto	Eslabón de la cadena de valor
Alemania Digitalización del puerto de Hamburgo	Necesidad de realizar una mejor gestión del tráfico en las carreteras, el ferrocarril y el puerto	Medición y control de las operaciones e infraestructuras portuarias mediante una explotación mejorada de los datos Implementación del puerto inteligente, a través de dos proyectos, smartPORT Logistics (SPL) y smartPORT Energy	<ul style="list-style-type: none"> – Integración de centros de control del tráfico (terrestre, marítimo y ferroviario) – Encaminamiento de los flujos de tráfico fluvial y vial según la situación de congestión en el puerto mediante sensores y actuadores (IdC) ubicados en la infraestructura portuaria para coordinar dichos flujos 	<ul style="list-style-type: none"> – Recepción de cargas y mercancías – Almacenamiento de cargas y mercancías – Transporte y distribución de cargas y mercancías
India Aplicación del IdC, <i>big data</i> y analítica de datos para optimizar la entrega de mercancías de DHL en India	El crecimiento exponencial del comercio electrónico derivó en la necesidad de reducir los costos logísticos de entrega	Solución SmartTruck, que combina IdC con <i>big data</i> y analítica de datos para optimizar la operación de entrega del último kilómetro	<ul style="list-style-type: none"> – Generación de rutas óptimas – Predicciones sobre las necesidades de mantenimiento de los camiones – Seguimiento del comportamiento de los conductores – Cumplimiento de entregas de mercancías a tiempo en un 95 % – Seguimiento de la mercancía – Reducción del tiempo de recorrido de hasta un 50 % 	<ul style="list-style-type: none"> – Transporte y distribución de cargas y mercancías
Corea del Sur Digitalización de las aduanas	Necesidad de contar con un sistema de aduanas eficiente	Simplificación de los procedimientos de autorización aduanera mediante un sistema web 100 % electrónico	<ul style="list-style-type: none"> – Sistemas de despacho de exportación, importación y gestión de carga comercial basados en internet – Información en tiempo real sobre el manejo de la carga – Reducción del tiempo y el costo de procesamiento, para facilitar el comercio y la seguridad de la carga – Seguimiento de la carga – Ahorros en almacenamiento de la carga y reducción de los gastos de personal e infraestructura 	<ul style="list-style-type: none"> – Recepción de cargas y mercancías – Almacenamiento de cargas y mercancías – Transporte y distribución de cargas y mercancías
Panamá Digitalización de la gestión y operación del canal de Panamá y aplicación del IdC	Necesidad de operar el canal de Panamá de la forma más eficiente posible	Monitoreo, control y despacho de los barcos mediante un sistema electrónico de visualización e información de navegación	<ul style="list-style-type: none"> – Uso del IdC para monitorear y controlar los niveles de agua, las plantas hidroeléctricas y estaciones de bombeo, el despacho de los barcos, la seguridad del canal y el despacho del ferrocarril intermodal – Utilización del sistema electrónico de visualización e información de navegación marítima para monitorear y controlar el despacho de los barcos 	<ul style="list-style-type: none"> – Recepción de cargas y mercancías – Almacenamiento de cargas y mercancías – Transporte y distribución de cargas y mercancías
Unión Europea Corredores logísticos de la Red Transeuropea de Transporte (TEN-T, por sus siglas en inglés)	<ul style="list-style-type: none"> – Realizar de manera eficiente el transporte de ciudadanos y mercancías – Reducir la dependencia del petróleo y las emisiones de CO₂ – Unir los sistemas de transporte de las zonas orientales y occidentales de la Unión Europea 	<ul style="list-style-type: none"> – Desarrollo y modernización de la infraestructura de la TEN-T – Expedición de la normatividad para la gobernanza de corredores logísticos – Definición del marco normativo para la implantación de sistemas inteligentes de transporte (SIT) 	<ul style="list-style-type: none"> – Disminución de la congestión en las carreteras – Mayor seguridad vial mediante la incorporación de servicios y aplicaciones para el reporte de emergencias – Integración de diferentes modos de transporte 	<ul style="list-style-type: none"> – Recepción de cargas y mercancías – Almacenamiento de cargas y mercancías – Transporte y distribución de cargas y mercancías

Beneficios incrementales del componente de digitalización en el sector de la logística

En el Cuadro 9 se presentan los principales beneficios económicos generados por la digitalización en logística. En la primera columna se enuncia el beneficio, en la segunda se

describe brevemente su origen y en la tercera, la forma de valorar los efectos previstos en el análisis beneficio-costo.

Cuadro 9 — Beneficios económicos de la digitalización en el sector de la logística

Beneficio	Descripción	Forma de valoración
Ahorros en costos de transporte	La digitalización de las cadenas de suministro permite optimizar constantemente las rutas y los modos de transporte de materias primas y productos terminados.	El beneficio económico se estima como el ahorro en costos de transporte entre la situación con proyecto y sin él.
Ahorros en almacenamiento	Con la digitalización de las cadenas de suministro se almacena y procesa información en tiempo real del estado de la carga, lo que permite emprender acciones que reduzcan el grado de incertidumbre sobre los tiempos de entrega de la materia prima y el producto final.	El beneficio económico se estima como la reducción en el costo financiero de los inventarios y la reducción en el pago de las tarifas de almacenamiento o arriendo de bodegas.
Menor incertidumbre en los tiempos de entrega	Las herramientas de analítica de datos habilitadas por la digitalización de las cadenas de suministro permiten mejorar las predicciones de demanda y con ello anticipar las necesidades de inventario en las zonas cercanas a los clientes, lo que reduce los tiempos de espera.	El beneficio económico se estima como la reducción en el costo financiero de los inventarios y la reducción en el pago de las tarifas de almacenamiento o arriendo de bodegas, así como la reducción en sanciones por incumplimiento en los tiempos de entrega.
Reducción de pérdidas de mercancía (daños)	Algunos sensores cuentan con dispositivos con la capacidad de reportar condiciones que afecten la integridad del producto, como temperatura, humedad, impactos, etc. La información permite establecer las causas de los deterioros y tomar las medidas correctivas necesarias, con lo cual los índices de mercancía desechada o rechazada disminuyen en el futuro.	Los beneficios asociados se estiman como la reducción en los costos de deterioro del producto, como multas, pago de pólizas y devolución del producto.
Ahorros en el manejo interno de los productos	La robótica integrada a la capacidad de procesamiento de información arroja enormes ganancias de eficiencia en el manejo de bodegas y terminales de transferencia de carga entre modos.	Los beneficios se miden como la reducción en gastos de operación asociados con la digitalización en el manejo de las bodegas.
Conectividad global para organizaciones de gran tamaño (productor-minorista)	La digitalización permite a las grandes organizaciones, mediante contratos de uso compartido de infraestructura y equipos de transporte y almacenamiento, llevar sus productos a cualquier localización en el mundo y organizar eficientemente la cadena de suministro.	Los beneficios se miden como el valor agregado por mayores ventas y la reducción de los costos logísticos en la cadena de suministro.
Acceso a mercados globales para firmas medianas y pequeñas	Las plataformas globales de envíos o transacciones apoyadas en tecnologías 4.0 (IdC, <i>big data</i> , analítica de datos, IA, <i>blockchain</i>) permiten a empresas medianas y pequeñas optimizar los procesos en las cadenas de suministro: producción, distribución y ventas.	Los beneficios se miden como el valor agregado por mayores ventas y la reducción de los costos logísticos en la cadena de suministro.
Descongestión vehicular en áreas urbanas	La introducción de drones, robots e impresoras 3D está revolucionando la forma de distribuir los paquetes al consumidor final. Con estas tecnologías se evitan una serie de viajes asociados con la distribución de mercancías en áreas urbanas que contribuyen de forma significativa a reducir la congestión vehicular.	Los beneficios económicos se valoran a partir de las reducciones en las externalidades medioambientales y de congestión.
Transparencia en la ejecución de contratos	Con tecnologías como la cadena de bloques es posible pactar contratos donde la responsabilidad se asigne directamente a cada eslabón en la cadena de suministro en función de su capacidad de gestionar los riesgos. Bajo este entramado contractual, cada compañía involucrada actúa de forma transparente porque las consecuencias de sus acciones son visibles.	Los beneficios económicos se valoran como la reducción en los costos de transacción asociados con la ejecución de contratos a lo largo de la cadena de suministro (reducción de pólizas, litigios, sanciones).

Incentivos y barreras para la digitalización en el sector de la logística

Desde una perspectiva técnica, la digitalización de la infraestructura logística exige el establecimiento de protocolos estandarizados para la intercomunicación entre todos los agentes y eslabones de las cadenas de suministro. El Gobierno puede desempeñar un papel importante concertando estos protocolos con los principales actores y adecuando sus propios servicios (aduanas, control fitosanitario, etc.) a las exigencias de la digitalización.

Igualmente, la generalización de corredores logísticos requiere buena conectividad. Se deben estudiar esquemas eficientes de acceso al espectro u otros medios de comunicación para asegurar la conectividad de la infraestructura, los vehículos y las mercancías.

Una barrera a la penetración de la digitalización en las cadenas de suministro es la informalidad de la actividad productiva en algunos sectores de los países de América Latina. La digitalización presume formalidad: cuentas bancarias, registro ante las Cámaras de Comercio, pago de impuestos, etc. Agentes formales no pueden engranar en sus procesos digitales a productores informales porque se crean vacíos en la documentación incompatibles con las cadenas digitales de suministro. Esquemas de tributación y bancarización simplificada que incentiven la formalización pueden ir en la dirección correcta para estimular la digitalización en la logística.

La promoción de contratos estándar para la contratación de servicios logísticos en plataformas digitales y multimodales puede impulsar la eficiencia en este sector.

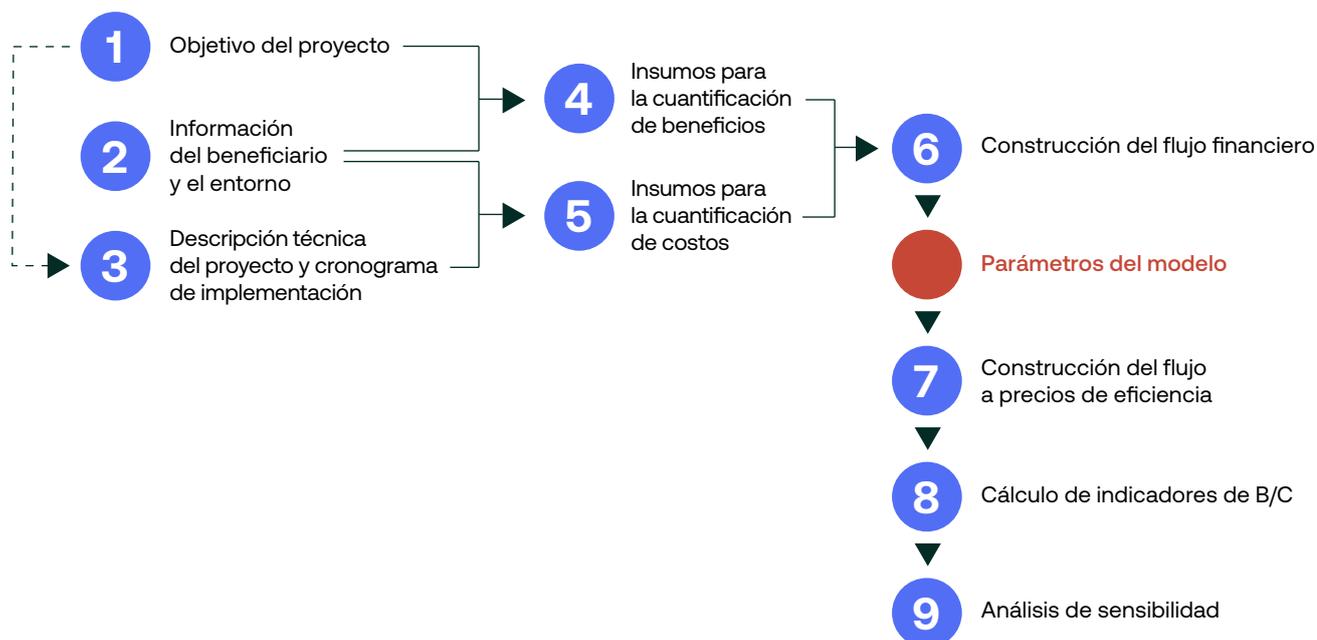
Formulación y evaluación de los proyectos de digitalización

Estructura de la guía para formular y evaluar proyectos de digitalización

Como parte del estudio, se desarrolló una guía que plantea los pasos a seguir para llevar a cabo una evaluación beneficio-costos (B/C) en los proyectos de digitalización de infraestructura para los sectores de la electricidad, la movilidad y la logística. En la primera parte (pasos 1, 2 y 3), se reúne la información necesaria del proyecto y su ejecutor. En los pasos 4 y 5, se procesa la información para construir los insumos de la evaluación, tanto en materia de beneficios como de costos.

La guía incluye una serie de parámetros utilizados para la evaluación socioeconómica, adaptados para los distintos países de América Latina que disponen de esta información. Posteriormente, la guía explica la forma de construir un flujo financiero, el flujo económico, el cálculo de los indicadores de evaluación del proyecto y la forma de llevar a cabo un análisis de sensibilidad.

Figura 9 — Pasos para formular y evaluar proyectos de digitalización de las redes eléctricas



Objetivo del proyecto

El primer paso consiste en establecer los objetivos del proyecto. Para ello, el formulador se debe preguntar cuáles son las necesidades específicas que busca resolver con el

proyecto de digitalización. El Cuadro 10 recoge una lista no exhaustiva de los objetivos de digitalización en estos sectores.

Cuadro 10 — Objetivos de los proyectos de digitalización en infraestructura

Eléctrico	Movilidad	Logística
Reducir los gastos operativos del área comercial	Reducir los tiempos de viaje de los ciudadanos	Reducir los costos de transporte
Reducir las pérdidas no técnicas	Reducir los costos de operación de los vehículos	Reducir los costos de almacenamiento
Mejorar el índice de pérdidas técnicas	Reducir la emisión de contaminantes al aire	Reducir los tiempos de entrega de insumos y productos
Reducir los índices de interrupciones en el suministro	Reducir la accidentalidad	Reducir los índices de deterioro de mercancías
Estimular la reacción de la demanda ante la señal de precios	Optimizar la operación del transporte público	Reducir la variabilidad en tiempos de entrega
Facultar técnica y comercialmente la introducción de recursos de generación embebidos en la red de distribución	Reducir los costos del recaudo en el transporte público	Ampliar el alcance geográfico del mercado
Aplazar inversiones en generación con fuentes convencionales	Aumentar la seguridad en los sistemas de transporte público	Facilitar el monitoreo y cumplimiento de los contratos a lo largo de la cadena de suministro
	Fortalecer la planeación de la infraestructura al servicio de la movilidad	Optimizar el sistema de entrega en la última milla
		Reducir la congestión en las áreas urbanas

Descripción del promotor del proyecto y su entorno

El proyecto se debe enmarcar en su entorno. En su formulación se debe describir el contexto económico, social e institucional en el que se desenvuelve⁶. El contexto macro ayudará a soportar las proyecciones de demanda que alimentan la

evaluación del proyecto. El entorno institucional permitirá identificar los actores involucrados en el éxito del proyecto y las debilidades y fortalezas de los responsables de su planeación, diseño, ejecución, operación y seguimiento.

Descripción del proyecto

En este paso se establecen con claridad los elementos físicos y actividades que componen el proyecto, el cual debe constituir una unidad autocontenida con la capacidad de suministrar los bienes y servicios planteados en los objetivos. En la identificación del proyecto se deben definir el área geográfica de cobertura, los beneficiarios y los responsables de cada una de las etapas del ciclo del proyecto. Además, se debe contar

con los siguientes estudios realizados por el promotor del proyecto:

- Proyección de la demanda.
- Análisis de alternativas.
- Diseños técnicos, costos y cronograma de implementación.

Insumos para la cuantificación de los costos

En este paso se determinan los insumos para estimar los costos de incorporación de los componentes de digitalización del proyecto (gastos de inversión y de operación), considerando una arquitectura de capas e indicando la metodología empleada (cotizaciones, información del estructurador del proyecto, etc.). Para las diferentes capas (dispositivos, conectividad, plataformas digitales y la capa de

inteligencia), el documento ofrece una serie de cuadros que guían la implementación de los componentes de digitalización:

- Equipos o aplicaciones.
- Funcionalidades de los equipos o aplicaciones.
- Determinantes de costos (gastos de inversión y operación).

Insumos para la cuantificación de los beneficios

El siguiente paso consiste en identificar los beneficios que genera el proyecto a la economía, en términos de la dirección y magnitud de los cambios en los excedentes de los consumidores y los productores; las externalidades positivas o negativas del proyecto; y el impacto de su costo en las finanzas públicas, en términos de movilización de recursos económicos

(costo de oportunidad de bienes y factores). En el Cuadro 11 se presenta la valoración económica propuesta para algunos de los beneficios contemplados en los proyectos de digitalización para cada sector.

⁶ Esta sección está basada en la guía de evaluación de proyectos de la Unión Europea (Comisión Europea, 2014).

Cuadro 11 — Valoración económica de los beneficios para los proyectos de digitalización en diferentes sectores

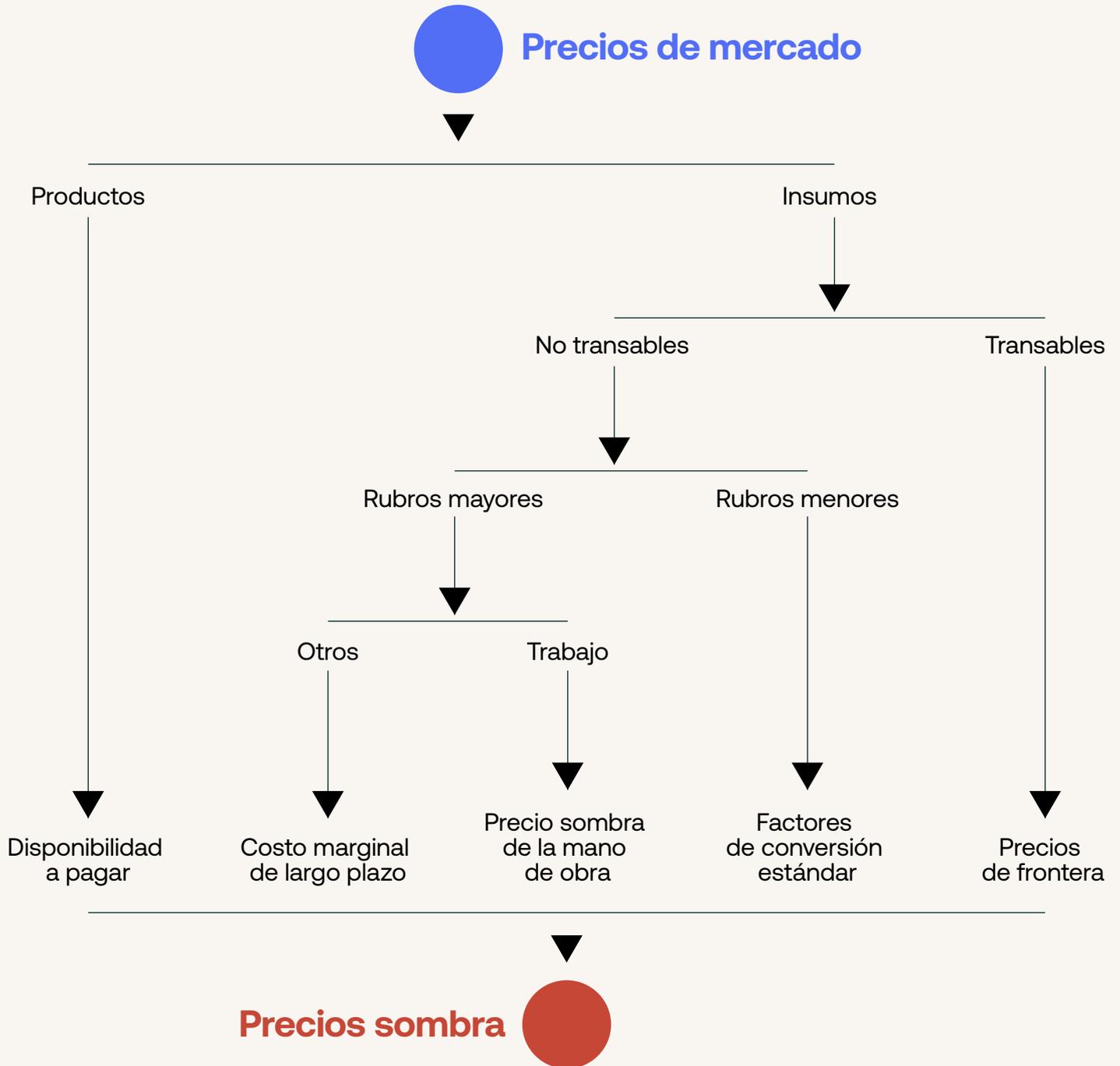
Eléctrico	Movilidad	Logística
Reducción en los gastos del área comercial: costo de oportunidad de la mano de obra	Reducción en tiempos de viaje: valor económico del tiempo	Ahorro en costos de transporte: modelación de costos de transporte con proyecto y sin él
Aumento en la eficiencia del recaudo: costo marginal de los fondos públicos	Reducción en costos de operación de los vehículos (VOC, por sus siglas en inglés): modelación de costos	Ahorro en costos de almacenamiento: reducción de costos financieros y en pago de arriendo, tarifas o infraestructura propia
Reducción de pérdidas técnicas: costo marginal de la energía mayorista	Reducción de la emisión de contaminantes: valor económico de la externalidad ambiental, material particulado (MP) y CO ₂ equivalente	Menor incertidumbre en tiempos de entrega: reducción de sanciones por incumplimiento y disponibilidad a pagar por mayor cumplimiento
Reducción de interrupciones en el suministro: precio sombra de los cortes de energía (disponibilidad a aceptar)	Reducción de la accidentalidad: costo económico de la vida humana, costos de atención médica	Mejor acceso a mercados globales: menor gasto de operación en áreas comerciales, distribución, facturación y tesorería. Mayor valor agregado por ampliación de las ventas
Promoción a la entrada de recursos de generación de energía descentralizada: aplazamiento de inversiones y reducción en el costo marginal	Optimización del transporte público: ahorros en gastos de inversión y operación	Descongestión vehicular en las áreas urbanas: menores externalidades ambientales y de congestión
Suavización del perfil horario de consumo: aplazamiento de inversiones y reducción en el costo marginal como respuesta a un esquema de tarifas dinámicas	Reducción de los costos de recaudo: disminución del gasto operativo	Transparencia en la ejecución de contratos: reducción en costos de pólizas y multas por incumplimiento. Reducción en costos de monitoreo de contratos

Construcción del flujo financiero

En esta etapa se organiza la información de ingresos y costos del proyecto como un flujo de caja financiero esperado del proyecto. Normalmente los flujos de caja financieros agregan los gastos operativos en muy pocos rubros. En los ejercicios de evaluación económica es importante desagregar los costos y gastos de forma que se pueda discriminar cada uno de los principales insumos, la mano de obra y los impuestos. De igual forma, los gastos de capital del proyecto se deben desagregar

entre los principales materiales, el alquiler de equipos, la mano de obra, los terrenos y otros inmuebles, y los impuestos. Como resultado del análisis del proyecto, se estima la tasa de retorno para los inversionistas y el valor presente neto con una tasa de descuento acorde con el nivel de riesgo percibida por estos. Un signo negativo en el valor presente del flujo de caja financiero no implica que el proyecto no sea conveniente desde la perspectiva económica y social.

Figura 10 — Paso de precios de mercado a precios de eficiencia



Fuente: Adaptado de Comisión Europea (2014).

Construcción del flujo económico

La metodología general de evaluación de proyectos supone mercados en competencia, donde el precio de los productos iguala el costo marginal y los factores son remunerados por sus respectivas productividades marginales. En la práctica, no obstante, las economías están expuestas a rigideces, distorsiones, externalidades y fallas de mercado⁷. Los factores del precio sombra o precio de cuenta se han construido precisamente para corregir los precios de mercado, de forma que reflejen el verdadero costo de oportunidad de los bienes y factores involucrados en el proyecto. En esta dirección, el siguiente paso de la evaluación es traducir a precios económicos el flujo financiero estructurado en la etapa anterior. Los beneficios económicos engloban tanto el producto del proyecto,

valorado según la disponibilidad a pagar de los usuarios, como el valor de las externalidades negativas mitigadas por el proyecto. En la Figura 10 se presenta un esquema de la metodología para transformar los precios de mercado en precios económicos.

Como se mencionó, esta guía contiene una serie de parámetros para los distintos países de la región que facilitan la construcción del flujo económico. Entre ellos están la tasa social de descuento, el costo marginal de los fondos públicos y otros parámetros específicos a los beneficios de la digitalización, como el precio sombra de la energía eléctrica no entregada, el valor económico de los accidentes o la criminalidad y el valor económico del tiempo.

Cálculo de los indicadores de beneficio-costo

Para establecer la bondad de un proyecto a partir de las estimaciones de los flujos de beneficios y costos, se utilizan normalmente tres indicadores complementarios entre sí: el valor presente, la tasa interna de retorno y la relación beneficio-costos. En algunos contextos, los indicadores calculados se estiman tomando como referente los flujos en precios de eficiencia, para diferenciarlos de los indicadores estimados a partir de los flujos financieros del proyecto. En los flujos económicos, como se discutió en la sección anterior, los beneficios incluyen la valoración que los usuarios dan al servicio (disponibilidad a pagar) y todas las posibles externalidades sobre la economía o el medio ambiente. Los costos, por su parte, se ajustan para corregir fallas de mercado y otras distorsiones, de forma que reflejen el costo de oportunidad de los recursos invertidos en el proyecto.

Cuando un proyecto presenta un indicador de evaluación negativo en términos financieros, pero positivo desde el punto de vista económico, conviene seguir adelante con el proyecto, aunque será necesario orientar recursos del presupuesto para asegurar su viabilidad financiera.

En el caso de que se evalúen diferentes alternativas de digitalización, conviene analizar el impacto incremental de cada una de ellas en términos de costos y beneficios. En algunos de estos casos, las alternativas pueden ser complementarias, sustitutas o exigir un orden en su despliegue.

⁷ Estructuras oligopólicas o monopólicas, donde el precio de mercado supera el costo marginal; servicios subsidiados y de tarifas administrativas, donde el precio es inferior al costo marginal; bienes o servicios que no tienen precio en el mercado.

Análisis de sensibilidad

La estimación de beneficios y costos se estructura sobre supuestos del comportamiento de variables que no están bajo el control de quien ejecuta el proyecto. El análisis de sensibilidad es útil para simular el desempeño del proyecto bajo diferentes escenarios de realización y se debe concentrar en aquellas variables con mayor incidencia en el proyecto. Cuando la incidencia de una o un grupo de variables es determinante en el desempeño del proyecto, puede ser conveniente llevar a cabo un análisis de riesgo, en el cual se caracterice la función de distribución y se lleven a cabo simulaciones para determinar la probabilidad de obtener desempeños insatisfactorios en el futuro.

Para gestionar los proyectos, por su parte, es conveniente estructurar una matriz que contenga en las filas una lista de los riesgos a los que el proyecto se puede ver expuesto. En las columnas, se presentan las posibles causas de la ocurrencia; el impacto de esta en los resultados del proyecto (proviene del análisis de sensibilidad); los efectos negativos sobre el mismo; el nivel (rango) de probabilidad de una ocurrencia y la severidad del impacto, así como las medidas para mitigar su ocurrencia o impacto.

Conclusiones

Con la evolución tecnológica de las industrias electrónica, informática y de telecomunicaciones se ha reducido sustancialmente el costo del transporte, almacenamiento y procesamiento de grandes volúmenes de datos con velocidades siempre en aumento. Estos cambios han permitido que surja una economía digital, que está llevando a los albores de la Cuarta Revolución Industrial y generando grandes cambios sociológicos.

La digitalización de las infraestructuras y las tecnologías digitales son un elemento clave para la habilitación, mejora o transformación de los procesos de diseño, planificación, gestión, mantenimiento y prestación de servicios. Esas tecnologías han contribuido a mantener cierta continuidad en los negocios y el empleo frente a la pandemia causada por el COVID-19 y desempeñarán un papel importante en la fase de recuperación económica.

La digitalización tiene el potencial de generar cambios en la cadena de valor de la electricidad. En concreto, las redes inteligentes son capaces de mejorar los índices de cortes de suministro, disminuir las pérdidas técnicas y comerciales de energía y generar ahorros en los costos de operación de las empresas. Con estas redes, además, se facilita la integración de fuentes de generación renovables descentralizadas en la red, con lo cual se pueden observar reducciones en el precio mayorista de la electricidad y se desplazan en el tiempo las expansiones de proyectos de generación con fuentes convencionales y de proyectos de transmisión y distribución. Con la digitalización de la infraestructura eléctrica, es posible también implementar mecanismos que permitan a la demanda reaccionar ante precios elevados en horas de congestión, de forma que posterguen su consumo a horarios de baja demanda y tarifas. Mercados con estas características se pueden traducir en menores facturas a los usuarios, un estímulo a la penetración de la movilidad eléctrica y una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero por parte de este sector.

La digitalización en el sector de la movilidad favorece el despliegue de equipos que habilitan la comunicación digital entre vehículos y entre estos y la infraestructura vial. Así mismo, ayuda a optimizar la gestión del tráfico y las mallas viales, lo que redundará en menores tiempos de viaje para la ciudadanía, menores costos de operación de los vehículos, menores emisiones de contaminantes y menores índices de accidentalidad. La digitalización también introduce eficiencia en la operación del transporte público, porque permite

gestionar la prioridad de los buses en las calzadas urbanas, entrega información para optimizar los despachos y disminuye los costos de recaudo. En cuanto a la información digital de los usuarios, da la posibilidad de mantener actualizadas las bases de origen y destino de los viajes en las áreas urbanas, con lo cual se facilita la planificación de la infraestructura y el manejo del tránsito. Finalmente, las plataformas digitales para la movilidad compartida amplían las opciones de transporte urbano a la ciudadanía con modos más limpios y menos incidencia en la congestión.

En cuanto al sector logístico, este ha sido líder en la incorporación de tecnologías digitales en sus procesos. Actualmente, cadenas completas de suministro de nivel global se gestionan en la capa digital. Las nuevas tecnologías facilitan la optimización de modos y rutas de transporte de mercancías. Con el uso de las plataformas logísticas digitales es posible compartir infraestructura entre diferentes operadores logísticos, con lo cual se reducen los costos de almacenamiento, la incertidumbre en los tiempos de entrega y los costos de gestión de los inventarios. El uso de sensores en la mercancía permite disminuir los índices de deterioro en el producto y establecer las responsabilidades de los distintos agentes en las cadenas logísticas. De esta forma, la digitalización ha facilitado enormemente la contratación de servicios logísticos y la ejecución eficiente de contratos. Con las plataformas de comercio electrónico se ha ampliado el mercado de las firmas, lo que se traduce en mayores economías de escala y menores costos comerciales. Finalmente, las nuevas tecnologías ofrecen soluciones de distribución de mercancías en áreas urbanas.

El reporte ofrece una revisión de experiencias relevantes de digitalización de la infraestructura en una muestra de países. De igual forma expone las tecnologías disponibles y los costos para introducir la digitalización en la infraestructura de electricidad, movilidad y logística. Se destina un capítulo a identificar los beneficios que introducen estas tecnologías y plantear las metodologías para valorar sus impactos desde una perspectiva económica.

A partir de lo anterior, se estructuró una guía práctica dirigida a facilitar, motivar, dimensionar y evaluar los proyectos que buscan incorporar la digitalización en la infraestructura de estos tres sectores. La guía se aplicó a un proyecto en cada uno de los sectores, comportándose de forma robusta.

Recomendaciones

De los análisis presentados en este reporte, se derivan las siguientes recomendaciones de políticas públicas, instrumentos regulatorios y de promoción de la industria que pueden contribuir al impulso de la digitalización de las infraestructuras en los tres sectores analizados.

En el sector de la energía

- Se considera pertinente que los países puedan establecer, en colaboración con los grupos de interés del sector privado, programas de largo plazo para identificar las metas nacionales para la digitalización de la infraestructura del sector eléctrico, incluyendo aspectos como infraestructura de medida avanzada, automatización de la red de distribución, recursos energéticos distribuidos y movilidad eléctrica. Dichos programas podrían contemplar estímulos fiscales que aceleren la velocidad de implementación de la digitalización.
- Es importante la adopción de estándares que permitan identificar las comunicaciones y flujos de electricidad entre cada uno de los ámbitos de actividad del suministro eléctrico (como generación, transmisión, distribución, DER, cliente) y las interrelaciones que se dan entre ellos, garantizando su interoperabilidad.
- Es necesario contar con un marco normativo que:
 - 1) defina los derechos y obligaciones de los diferentes actores involucrados en la implementación de redes inteligentes (proveedores, operadores, comercializadores y otros);
 - 2) articule la estandarización técnica con el despliegue e implementación de la tecnología para que haya claridad sobre las condiciones que se deben cumplir;
 - 3) establezca la gestión efectiva de los recursos de energía distribuidos, así como los procesos de medición y pago, y
 - 4) defina los esquemas de gobernanza de los datos de los usuarios del sector eléctrico, así como la política de datos y privacidad asociada.
- Debe resolverse el problema del último kilómetro, que permite la conexión entre los medidores inteligentes y el resto de la red de una forma costo efectiva.

En el sector de la movilidad

- La definición de protocolos entre infraestructura y vehículos (V2I) que garanticen la interoperabilidad de los sistemas para aplicaciones como peajes electrónicos o implementación de cargos por congestión.
- El uso de innovaciones sociales en la implementación de medidas que suelen implicar una reacción ciudadana adversa cuando el público visualiza los eventuales costos económicos, pero no ha vivido los beneficios que la medida implica, tales como menos congestión, menos contaminación o menores tiempos de viaje.
- El establecimiento de un marco normativo para la introducción de cierto tipo de innovaciones, como las cámaras de foto para la detección automática de infracciones de tránsito y emisión de la multa correspondiente o la utilización del reconocimiento facial para combatir el fraude en el pago en las estaciones de los sistemas de transporte masivo. Esto se requiere para que dichas innovaciones generen las adecuadas protecciones a los ciudadanos contra eventuales abusos, pero también para que las innovaciones cuenten con un piso jurídico sólido.
- La flexibilización en los marcos contractuales, por ejemplo, de los sistemas de recaudo en la operación del transporte público, los cuales pueden convertirse en una barrera para la innovación en la digitalización.

En el sector de logística

- Una estandarización que permita la interoperabilidad entre agentes y eslabones de la cadena, ya que es uno de los elementos clave para la promoción y el desarrollo exitoso de la digitalización en el sector logístico. Por ejemplo, la implementación de sistemas de transporte inteligentes (STI) en el sector de transporte por carretera y la definición de las interfaces con otros modos de transporte son de interés, porque integran las telecomunicaciones, la electrónica y las tecnologías de la información con la ingeniería de transporte con el propósito de planear, diseñar, manejar, mantener y gestionar los sistemas de transporte. Esto permite mejorar el impacto ambiental, la eficiencia energética, la seguridad y la protección del transporte por carretera, incluido el de mercancías peligrosas, la seguridad pública y la movilidad de viajeros y productos, garantizando al mismo tiempo el funcionamiento del mercado interior y unos niveles más altos de competitividad y empleo, sin perjuicio de materias relativas a la seguridad nacional.
- La adopción de políticas públicas y planes estratégicos de largo plazo que permitan procesos de transformación digital de gran escala, en términos de número de agencias del gobierno y compañías conectadas. Esto podría lograrse, por ejemplo, mediante la simplificación y estandarización de procedimientos que tengan como propósito central minimizar el costo logístico y asegurar el despacho acelerado de mercancías.

Referencias

Barreto, L., Amaral, A. y Pereira, T. (2017). «Industry 4.0 implications in logistics: an overview». *Manufacturing Engineering Society International Conference 2017*. Vigo.

Comisión Europea (2014). *Guide to cost-benefit analysis of investment projects. Economic appraisal tool for cohesion policy 2014-2020*. Unión Europea. https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/studies/pdf/cba_guide.pdf

GEB (13 de julio de 2020). «Preguntas frecuentes». Obtenido de *¿Cómo funciona la cadena de prestación del servicio de energía eléctrica en Colombia?*. Grupo Energía Bogotá. <https://www.grupoenergíabogota.com/eeb/index.php/en/company/preguntas-frecuentes>

IEA (2017). *Digitalization & energy*. París: Agencia Internacional de la Energía.

OCDE (2019). *Going digital: shaping policies, improving lives*. París: Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico.

Schwab, K. (2016). *La cuarta revolución industrial*. Madrid: Penguin Random House.

