

# 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



# 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

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.

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](http://scioteca.caf.com)

Copyright © 2022 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/>.



# 10

Introducción

# 12

Digitalización de las infraestructuras:  
una visión desde la perspectiva tecnológica

# 29

Aspectos generales de la metodología beneficio-coste

# 37

Digitalización de la infraestructura en el sector de la energía eléctrica

# 86

Digitalización de la infraestructura en el sector de la movilidad

# 132

Digitalización de la infraestructura en el sector de la logística

# 165

Aspectos generales de la guía metodológica para la formulación  
y evaluación paso a paso de los proyectos de digitalización

# 172

Conclusiones y recomendaciones para la adopción de políticas  
e instrumentos para impulsar la digitalización funcional  
de las infraestructuras en América Latina

# 178

Referencias

# Cuadros

22	Cuadro 1.1 — Capacidades teóricas de las redes 5G
24	Cuadro 1.2 — Modelos de servicios de computación en la nube
33	Cuadro 2.1 — Tasas de descuento social en países o bloques económicos dentro y fuera de América Latina
42	Cuadro 3.1 — Política de acceso y privacidad de la información en el SMIP
52	Cuadro 3.2 — Categorización de las tecnologías utilizadas en las experiencias analizadas en el sector de la energía eléctrica
53	Cuadro 3.3 — Matriz con los principales hallazgos de las experiencias estudiadas
63	Cuadro 3.4 — Sistemas de recolección de datos de redes inteligentes
67	Cuadro 3.5 — Generación de valor a partir de la implementación y desarrollo de las redes inteligentes
68	Cuadro 3.6 — Tecnología, nuevos negocios y servicios que promoverán la digitalización del sector eléctrico
69	Cuadro 3.7 — Equipos, aplicaciones, funcionalidades y motores de costos (CAPEX y OPEX) para la digitalización de los proyectos de infraestructura del sector eléctrico
74	Cuadro 3.8 — Estimaciones del sacrificio económico por cortes en el suministro de energía eléctrica en cinco países de América Latina (USD/Mwh)
76	Cuadro 3.9 — Costo marginal de los fondos públicos (CMPF)
85	Cuadro 3.10 — Indicadores para el seguimiento de la digitalización de la infraestructura del sector eléctrico
87	Cuadro 4.1 — Tecnologías utilizadas en los sistemas de control
87	Cuadro 4.2 — Tecnologías utilizadas en los sistemas de monitoreo y vigilancia
88	Cuadro 4.3 — Tecnologías utilizadas en el sistema de gestión de la información
88	Cuadro 4.4 — Tecnologías utilizadas en los sistemas de recaudo
96	Cuadro 4.5 — Elementos tecnológicos de los SEPP
102	Cuadro 4.6 — Categorización de las tecnologías utilizadas en las experiencias analizadas en el sector de la movilidad
103	Cuadro 4.7 — Matriz con los principales hallazgos de las experiencias estudiadas
114	Cuadro 4.8 — Tecnología, nuevos negocios y servicios que promoverán la digitalización del sector de la movilidad
115	Cuadro 4.9 — Equipos, aplicaciones, funcionalidades y determinantes de los costos (CAPEX y OPEX) para la digitalización de los proyectos de infraestructura del sector de la movilidad
122	Cuadro 4.10 — Estimación del valor del tiempo
126	Cuadro 4.11 — Factores de emisión de contaminantes del diésel y el gas natural (ejemplo para un bus urbano de 80 pasajeros)
126	Cuadro 4.12 — Factores de emisión de GEI y material particulado
131	Cuadro 4.13 — Indicadores para el seguimiento de la digitalización de la infraestructura del sector de la movilidad
143	Cuadro 5.1 — Categorización de las tecnologías utilizadas en las experiencias analizadas en el sector logístico
144	Cuadro 5.2 — Matriz con los principales hallazgos de las experiencias estudiadas
153	Cuadro 5.3 — Tecnología, nuevos negocios y servicios que promoverán la digitalización del sector logístico
154	Cuadro 5.4 — Equipos, aplicaciones, funcionalidades y determinantes de costos (CAPEX y OPEX) para la digitalización de los proyectos de infraestructura del sector logístico
164	Cuadro 5.5 — Indicadores para el seguimiento de la digitalización de la infraestructura del sector logístico
166	Cuadro 6.1 — Objetivos de los proyectos de digitalización en infraestructura
168	Cuadro 6.2 — Valoración económica de los beneficios de los proyectos de digitalización

# Figuras

- 13 Figura 1.1 — La convergencia entre las industrias de telecomunicaciones, informática y electrónica y el surgimiento de las tecnologías de la Cuarta Revolución Industrial
- 15 Figura 1.2 — La creación de valor a partir de procesos de digitalización
- 17 Figura 1.3 — Niveles de análisis de la digitalización de la infraestructura en el estudio
- 19 Figura 1.4 — Descripción técnica del internet de las cosas
- 19 Figura 1.5 — Modelo de referencia del internet de las cosas
- 20 Figura 1.6 — Comparación simplificada de las tecnologías 2G, 3G, 4G y 5G
- 21 Figura 1.7 — Aplicaciones y servicios que soportarán las redes 5G
- 23 Figura 1.8 — Ecosistemas del *big data*
- 25 Figura 1.9 — Propiedades básicas de la cadena de bloques
- 25 Figura 1.10 — Modo de operación de la cadena de bloques
- 31 Figura 2.1 — Simplificación de la estimación de beneficios bajo la “regla del medio”
- 41 Figura 3.1 — Ecosistema de la DCC
- 45 Figura 3.2 — Papel de Grid Edge en el sistema de energía
- 46 Figura 3.3 — Metas propuestas para la implementación de redes inteligentes en Colombia
- 49 Figura 3.4 — Ruta energética 2018-2022
- 56 Figura 3.5 — Capas y niveles de interoperabilidad del SGAM
- 57 Figura 3.6 — Marco de referencia del SGAM
- 61 Figura 3.7 — Generación de valor a partir de la digitalización de la infraestructura eléctrica
- 62 Figura 3.8 — Componentes para la mejora del diseño y la planeación de las redes eléctricas mediante la digitalización y el desarrollo de redes inteligentes
- 65 Figura 3.9 — Esquemas y tecnologías digitales aplicados a infraestructuras y activos del sector de la energía eléctrica
- 90 Figura 4.1 — Concepto de MaaS
- 93 Figura 4.2 — Mapa descriptivo de los límites geográficos para la aplicación de cargos de congestión en Estocolmo
- 99 Figura 4.3 — Trayectoria de espacio temporal a partir de la huella digital
- 107 Figura 4.4 — Diagrama esquemático del subsistema de control de la flota
- 108 Figura 4.5 — Diagrama esquemático del subsistema de recarga o recaudo
- 108 Figura 4.6 — Diagrama esquemático del subsistema de información y servicio al usuario
- 109 Figura 4.7 — Diagrama esquemático del subsistema de *big data* e inteligencia artificial
- 110 Figura 4.8 — Esquema general de los subsistemas requeridos para la digitalización del transporte público
- 111 Figura 4.9 — Esquemas y tecnologías digitales aplicados a las infraestructuras y los activos del sector de transporte
- 121 Figura 4.10 — Microeconomía de la congestión vehicular
- 136 Figura 5.1 — Diagrama conceptual del sistema UNI-PASS
- 147 Figura 5.2 — Flujos de material e información en la cadena del sector logístico
- 149 Figura 5.3 — Componentes para la mejora del diseño, planeación y gestión de los sistemas logísticos mediante la digitalización y la logística 4.0
- 151 Figura 5.4 — Esquemas y tecnologías digitales aplicados a la infraestructura y los activos del sector logístico
- 152 Figura 5.5 — Factores que influyen la adopción del *blockchain* en logística
- 166 Figura 6.1 — Estructura de la guía para formular y evaluar proyectos de digitalización paso a paso
- 169 Figura 6.2 — Paso de precios de mercado a precios de eficiencia

# Abreviaciones

<b>2G</b>	Redes de segunda generación
<b>3D</b>	Tridimensional
<b>3G</b>	Redes de tercera generación
<b>4G</b>	Redes de cuarta generación
<b>5G</b>	Redes de quinta generación
<b>ACM</b>	Association for Computing Machinery
<b>ACP</b>	Autoridad del Canal de Panamá
<b>ADA</b>	Automatización de la red de distribución ( <i>advance distribution automatization</i> )
<b>AIE</b>	Agencia Internacional de la Energía
<b>AMI</b>	Infraestructura de medición inteligente ( <i>advanced metering infrastructure</i> )
<b>AMR</b>	Medidores de lectura automática ( <i>automatic meter reading</i> )
<b>ANPR</b>	Reconocimiento automático del número de matrícula ( <i>automatic number plate recognition</i> )
<b>ANTEL</b>	Administración Nacional de Telecomunicaciones
<b>API</b>	Interfaz de programación de aplicaciones ( <i>application programming interface</i> )
<b>APP</b>	Asociación público-privada
<b>B/C</b>	Beneficio/costo
<b>B2C</b>	De la empresa al consumidor ( <i>bussines to consumer</i> )
<b>BEMS</b>	Sistema de gestión de energía para edificios ( <i>building energy managment systems</i> )
<b>BID</b>	Banco Interamericano de Desarrollo
<b>CAG</b>	Control automático de la generación ( <i>automatic generation control</i> )
<b>CAPEX</b>	Gasto de capital
<b>CBTC</b>	Control de trenes basado en las comunicaciones ( <i>communications based train control</i> )
<b>CCO</b>	Centro de control operacional
<b>CEN</b>	Comité Europeo de Normalización
<b>CENELEC</b>	Comité Europeo de Normalización Electrotécnica
<b>CMFP</b>	Costo marginal de los fondos públicos
<b>COVID-19</b>	Enfermedad del coronavirus 19
<b>CPUC</b>	Comisión de Servicios Públicos de California (California Public Utilities Commission)
<b>CREG</b>	Comisión de Regulación de Energía y Gas
<b>DACR</b>	Reconfiguración automática de los circuitos de distribución ( <i>distribution automation circuit reconfiguration</i> )
<b>DCC</b>	Data Communications Company
<b>DER</b>	Recursos de energía distribuidos ( <i>distributed energy resources</i> )
<b>DERMS</b>	Sistemas de gestión de recursos de energía distribuidos ( <i>distributed energy resource management systems</i> )
<b>DOE</b>	Departamento de Energía (Department of Energy)
<b>DSRC</b>	Comunicación dedicada de corto alcance ( <i>dedicated short-range communications</i> )
<b>DTLF</b>	Foro de Transporte y Logística Digital (Digital Transport and Logistics Forum)
<b>ECDIS</b>	Sistema electrónico de visualización e información de navegación marítima
<b>ETSI</b>	Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones
<b>EUR</b>	Euro
<b>FTTx</b>	Accesos de banda ancha por fibra óptica ( <i>fiber to the x</i> )
<b>G2V</b>	De la red a los vehículos ( <i>greed to vehicles</i> )
<b>GEI</b>	Gases de efecto invernadero
<b>GIS</b>	Sistemas de información geográfica ( <i>geographic information system</i> )
<b>GPB</b>	Libras esterlinas
<b>GPS</b>	Sistema de posicionamiento global ( <i>global positioning system</i> )
<b>HDM-4</b>	Modelo de diseño y gestión de carreteras (Highways Design Model)
<b>HPA</b>	Autoridad Portuaria de Hamburgo



<b>IA</b>	Inteligencia artificial
<b>IdC</b>	Internet de las cosas ( <i>internet of things o IoT</i> )
<b>IED</b>	Dispositivo electrónico inteligente ( <i>intelligent electronic device</i> )
<b>IHD</b>	Visualización en hogares ( <i>in-home display</i> )
<b>IP</b>	Protocolo de internet ( <i>internet protocol</i> )
<b>IVA</b>	Impuesto al valor agregado
<b>KCS</b>	Administración de Aduanas de Corea del Sur
<b>LoRa</b>	Amplio alcance
<b>M2M</b>	Entre máquinas ( <i>machine to machine</i> )
<b>MaaS</b>	Movilidad como servicio ( <i>mobility as a service</i> )
<b>MBTU</b>	Millón de unidades térmicas británicas
<b>MP</b>	Material particulado
<b>NAN</b>	Redes de conexión locales ( <i>neighborhood area network</i> )
<b>NEM</b>	Medición neta de energía ( <i>net energy metering</i> )
<b>NERC</b>	North American Electric Reliability Corporation
<b>NIST</b>	National Institute of Standards and Technology
<b>OCDE</b>	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
<b>OEA</b>	Operador económico autorizado
<b>Ofgem</b>	Oficina de los Mercados de Gas y Electricidad
<b>OMA</b>	Organización Mundial de Aduanas
<b>OPEX</b>	Gastos de operación
<b>P2P</b>	Entre pares ( <i>peer to peer</i> )
<b>PMU</b>	Unidades medidoras de fase ( <i>phasor measurement unit</i> )
<b>RFID</b>	Identificación por radiofrecuencia ( <i>radio frequency identification</i> )
<b>SAIDI</b>	Índice de duración promedio de las interrupciones del sistema ( <i>system average interruption duration index</i> )
<b>SAIFI</b>	Índice de frecuencia promedio de interrupciones del sistema ( <i>system average interruption frequency index</i> )
<b>SAVE</b>	Sistema de alimentación de vehículos eléctricos
<b>SCADA</b>	Control de la supervisión y adquisición de datos ( <i>supervisory control and data acquisition</i> )
<b>SEC</b>	Código de energía inteligente ( <i>smart energy code</i> )
<b>SEK</b>	Corona sueca
<b>SEPP</b>	Sistema electrónico de pago de pasajes
<b>SGAM</b>	Arquitectura de referencia de las redes eléctricas inteligentes
<b>SGD</b>	Dólares de Singapur
<b>SMIP</b>	Programa de Implementación de Medidores Inteligentes (Smart Metering Implementation Program)
<b>SMMC</b>	Sistemas de medición, monitoreo y control
<b>SMS</b>	Mensajes cortos de texto
<b>STI</b>	Sistemas de transporte inteligente
<b>TEN-T</b>	Red Transeuropea de Transporte
<b>TEU</b>	Unidad equivalente a 20 pies
<b>UIT</b>	Unión Internacional de Telecomunicaciones
<b>UPME</b>	Unidad de Planeación Mineroenergética
<b>UTE</b>	Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas
<b>UYU</b>	Peso de Uruguay
<b>V2G</b>	Entre los vehículos y la red ( <i>vehicle to grid</i> )
<b>V2I</b>	Entre los vehículos y la infraestructura ( <i>vehicle to infrastructure</i> )
<b>V2V</b>	Entre vehículos ( <i>vehicle to vehicle</i> )
<b>VE</b>	Vehículos eléctricos
<b>VOC</b>	Costos de operación vehicular ( <i>vehicle operating costs</i> )
<b>WEF</b>	Foro Económico Mundial (World Economic Forum)
<b>WiFi</b>	Fidelidad inalámbrica

# Introducción

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, 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 tres sectores mencionados. En él se analizan las principales tendencias y las oportunidades que ofrece la digitalización de las infraestructuras a través de diversas experiencias internacionales, incluidas algunas en América Latina.

Además de esta introducción, el documento se divide en siete capítulos. El primero se centra en la digitalización de las infraestructuras desde el punto de vista de la tecnología, explorando la forma en que la innovación técnica y la convergencia entre diferentes industrias —la de electrónica, informática y telecomunicaciones— han permitido que la sociedad actual se encuentre en los albores de lo que se conoce ya como la Cuarta Revolución Industrial. En ese contexto, se explora la digitalización de las infraestructuras en términos del uso de las tecnologías y los datos digitales, así como la interconexión, que da como resultado actividades nuevas o cambios en las actividades existentes. Este proceso de digitalización utiliza tanto tecnologías de la tercera revolución industrial (típicamente de conectividad e interoperabilidad), que permiten el cierre de brechas, como un

conjunto de nuevas tecnologías habilitantes que caracterizan dicha transformación: el internet de las cosas (IdC)<sup>1</sup>, las redes 5G, la computación en la nube, los datos masivos o macrodatos (más conocidos por su nombre en inglés, *big data*), la cadena de bloques (*blockchain*) y la inteligencia artificial (IA).

En el Capítulo 2 se presenta un marco conceptual general sobre la metodología para el análisis beneficio-costos que se aplicará a los impactos positivos y negativos de la incorporación de componentes de digitalización en las infraestructuras de los sectores de la energía eléctrica, la movilidad y la logística. Este análisis apoya la toma de decisiones sobre la ejecución de los proyectos con bases objetivas, al establecer si su desarrollo genera una rentabilidad económica y social superior al costo de oportunidad de los recursos invertidos. Si la respuesta es afirmativa, el proyecto añadirá valor, por lo que conviene seguir adelante con su ejecución; en caso contrario, es mejor abstenerse y liberar los recursos para atender otras iniciativas de mayor impacto socioeconómico. Teniendo en cuenta lo anterior, a partir de la aplicación de esta metodología, se identifican los beneficios y costos que conlleva la digitalización de la infraestructura en los sectores de la electricidad, la movilidad y la logística. El propósito de ese ejercicio es dotar de elementos de juicio a los tomadores de decisiones públicas, los ejecutivos de CAF y sus contrapartes en los países para decidir sobre la conveniencia, dimensionamiento y estructuración de los componentes de digitalización en los proyectos.

El documento dedica un capítulo completo a cada uno de los tres sectores bajo análisis (Capítulos 3, 4 y 5), utilizando una misma estructura descriptiva para todos, pero permitiendo que diferentes expertos puedan focalizarse en su sector. La estructura de estos capítulos tiene cuatro bloques que se describen a continuación:

— En primer lugar, cada capítulo presenta cinco o seis experiencias internacionales exitosas en materia de digitalización para el sector bajo análisis. Estas experiencias incluyen tanto proyectos de digitalización enfocados al cierre de brechas como proyectos donde

<sup>1</sup> También conocido por las siglas en inglés IoT (*internet of things*).

tienen presencia nuevas tecnologías habilitantes y en los que se evidencian desarrollos y avances particulares en alguno de los aspectos incluidos en el sector que se está analizando. Las experiencias son diversas en términos geográficos, de manera que, del total de los 17 ejemplos seleccionados, hay 6 experiencias de Europa, 7 de Latinoamérica, 3 de Asia y 1 de Norteamérica. El análisis de las buenas prácticas termina con un resumen de los incentivos regulatorios o fiscales identificados en los distintos niveles de gobierno que pudieran impactar positivamente en la promoción y desarrollo de las distintas iniciativas.

- En segundo lugar, se realiza una caracterización del uso de las tecnologías digitales para cada sector, comprendiendo varias dimensiones: i) se analiza el uso de tecnologías digitales para el diseño y gestión de la infraestructura y los activos de cada uno de los subsectores; ii) se identifican los esquemas y tecnologías digitales aplicados a las infraestructuras y activos de dichos sectores, considerando las capas de conectividad, los dispositivos o sensores, la recolección y el procesamiento de datos y sus aplicaciones; iii) se analiza el potencial de las tecnologías digitales para la desintegración de procesos y la obtención de eficiencias; y iv) se estudia el potencial de desarrollo de nuevos servicios, así como el valor agregado que la digitalización supone para cada uno de los subsectores.
- En tercer lugar, se identifican los costos de la digitalización para cada uno de los sectores analizados a partir de los costos incrementales —tanto en gastos de inversión (*capital expenditure* o CAPEX, por sus siglas en inglés) como de operación (*operating expenses* o OPEX)— que conllevan los equipos y aplicaciones requeridos para digitalizar estas infraestructuras. Posteriormente, se determinan y describen los beneficios que trae consigo la digitalización de las infraestructuras en cada uno de los tres sectores.
- Concluida esta tarea, se tipifican y describen las diferentes tipologías de proyectos de digitalización que CAF podrá desarrollar en los países de América Latina. Posteriormente

se identifican los incentivos y barreras para la digitalización de las infraestructuras de los sectores de la electricidad, la movilidad y la logística en los países de la región y, por último, se proponen indicadores para medir la evolución y el nivel de avance de la digitalización en esos tres sectores.

El Capítulo 6 del reporte debate aspectos generales de la guía metodológica para la formulación y evaluación de proyectos de digitalización. En él, se ofrece una visión general de cada uno de los pasos requeridos para reunir la información necesaria del proyecto y su ejecutor, construir los insumos de la evaluación, tanto en materia de beneficios como de costos, utilizar los parámetros de evaluación socioeconómica, 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. Dado que varios de los pasos son muy específicos a cada sector, se desarrollan tres documentos separados complementarios<sup>2</sup>, uno para cada sector. En ellos se explica en forma detallada la aplicación de la guía, de manera que los lectores interesados pueden consultarlos.

El objetivo de este trabajo es contribuir al impulso de la digitalización en los sectores de la energía, la movilidad y la logística por su poder para transformar positivamente los procesos de diseño, planificación, gestión y operación en estos sectores. Para ello, en el Capítulo 7 se establecen las conclusiones de los análisis realizados y se proveen recomendaciones sobre políticas e instrumentos que pueden impulsar la digitalización funcional de las infraestructuras en beneficio de instituciones, empresas y ciudadanos de América Latina.

<sup>2</sup> Estos documentos son presentados como Anexos al presente texto, aunque su contenido va más allá y han sido redactados de manera que puedan ser leídos de manera autónoma o junto con los otros componentes de la guía.

# Digitalización de las infraestructuras: una visión desde la perspectiva tecnológica

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

La industria de la electrónica y la informática comenzó en 1948 con la invención del transistor y ha sido impulsada permanentemente por la ley de Moore<sup>3</sup>. Gracias a esta ley, ha seguido una trayectoria de innovación ininterrumpida durante los últimos 70 años, que ha resultado en la construcción de computadores cada vez más pequeños, económicos y de mayor capacidad. Es una historia bien conocida, que comienza con la primera generación de computadores centrales (*mainframe*) en la década de 1950 y pasa por la masificación del computador de escritorio, hasta llegar al surgimiento de múltiples terminales más pequeñas, como los computadores portátiles, las tabletas y los teléfonos inteligentes.

Por su parte, la historia de la industria de las telecomunicaciones es un poco más antigua. Nació con la invención del telégrafo en 1837, pero también ha contemplado significativos avances desde entonces: la invención del teléfono en 1854, las primeras transmisiones inalámbricas en 1897, el primer satélite de comunicaciones en 1962 y los primeros teléfonos celulares en 1973, aunque su masificación solo comenzó en la década de 1980.

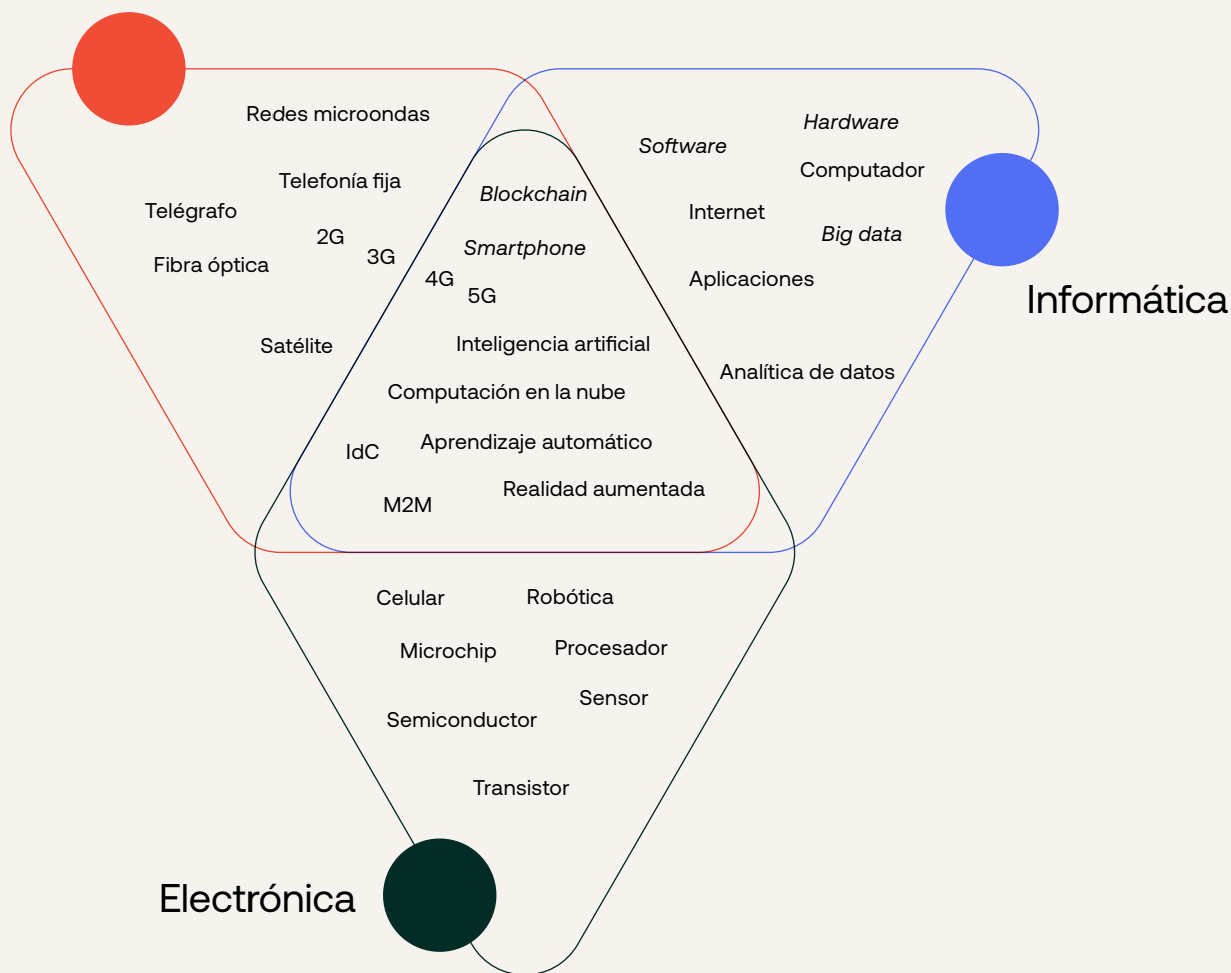
Los avances paralelos en las industrias de telecomunicaciones, electrónica e informática son los que dan origen a la denominada Tercera Revolución Industrial. Esta se inició en la década de 1960 y generalmente se conoce como la revolución digital o del ordenador (Schwab, 2016). Uno de sus avances más importantes fue la invención del internet, que surgió en 1969 como medio de comunicación entre computadores. Durante la primera mitad de la década de 1990, el internet comenzó su proceso de masificación. Así, aparecieron innovaciones que facilitaban la comunicación entre seres humanos, como el correo electrónico, o que permitían la creación de sistemas de distribución de documentos interconectados y accesibles mediante internet, por medio de navegadores, lo que dio origen a la denominada World Wide Web. El crecimiento de internet ha ido de la mano del incremento en la penetración y la evolución tecnológica de las redes móviles de telecomunicaciones, que se suele explicar como una sucesión de generaciones tecnológicas (G)<sup>4</sup>, cada una caracterizada por un cambio fundamental en la naturaleza del servicio y definida por una serie de estándares y funcionalidades (Sharma, 2013).

<sup>3</sup> La Ley de Moore indica que aproximadamente cada dos años se duplica el número de transistores en un microprocesador (Moore, 1965; Intel, 2005).

<sup>4</sup> Las cuales suelen denominarse 1G (primera generación), 2G (segunda generación), 3G (tercera generación), 4G (cuarta generación) y 5G (quinta generación).

Figura 1.1 — La convergencia entre las industrias de telecomunicaciones, informática y electrónica y el surgimiento de las tecnologías de la Cuarta Revolución Industrial

## Telecomunicaciones



Una de las principales consecuencias de la evolución tecnológica de las industrias electrónica, informática y de telecomunicaciones ha sido un costo decreciente del transporte, almacenamiento y procesamiento de grandes volúmenes de datos. Esto ha sido posible gracias a capacidades de procesamiento y almacenamiento cada vez mayores, así como a tecnologías de acceso y transmisión con velocidades siempre en aumento. Los cambios mencionados han permitido que surja una economía digital, la cual hace referencia a una amplia gama de actividades económicas que utilizan información y conocimiento digitalizados como factores clave de la producción. En ese contexto, las tecnologías digitales, como el internet, la computación en la nube y los datos masivos (*big data*) se utilizan para recopilar, almacenar, analizar y compartir información digitalmente. La economía digital crea beneficios y eficiencias, transforma las interacciones sociales y la forma como las personas interactúan, trabajan y se divierten, generando grandes cambios sociológicos (ADB, 2018).

Los cambios tecnológicos en estas tres industrias nos están llevando también, de acuerdo con el Foro Económico Mundial (WEF, por sus siglas en inglés), a los albores de una Cuarta Revolución Industrial, que 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).

Por su parte, la industria 4.0, un término que surgió en la Feria de Hannover (Alemania) en 2011, se usa para describir la forma en que la Cuarta Revolución Industrial puede transformar las cadenas de valor globales, en “(...) un mundo en el que sistemas de fabricación virtuales y físicos cooperan entre sí de una manera flexible en todo el planeta. Esto permite la absoluta personalización de los productos y la creación de nuevos modelos de operación” (Schwab, 2016). Se trata por tanto de una aproximación basada en la integración de los procesos comerciales y de fabricación, así como de los actores de la

cadena de valor de una empresa, tanto los proveedores como los clientes, cuya ejecución está basada en tecnologías como el internet de las cosas, la robótica, los datos masivos y la realidad aumentada. Estas tecnologías tienen como propósito el desarrollo de procesos de fabricación más inteligentes, incluyendo dispositivos, máquinas, módulos de producción y productos que pueden intercambiar información y controlarse entre sí. Estos procesos productivos están caracterizados por su control descentralizado y conectividad avanzada e implican la producción, intercambio y almacenamiento de una gran cantidad de datos (Rojko, 2017).

El sustrato de esta nueva revolución industrial son tecnologías preexistentes, algunas de las cuales corresponden a innovaciones incrementales, pero también a invenciones e innovaciones disruptivas con un alto potencial transformacional (ver Figura 1.1).

La OCDE (2019) considera que:

Los aumentos dramáticos en la potencia informática y una disminución simultánea de los costos relacionados durante los últimos 60 años han impulsado el rápido avance de las tecnologías digitales (...) En la actualidad, un ecosistema de tecnologías digitales interdependientes sustenta la transformación digital y evolucionará para impulsar futuros cambios económicos y sociales<sup>5</sup>.

La OCDE menciona siete tecnologías digitales que caracterizan dicha transformación: la IA, el IdC, las redes 5G, la computación en la nube, el *big data*, las cadenas de datos (*blockchain*) y la creciente potencia de cómputo, e 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 horizonte”<sup>6</sup> (OCDE, 2019).

## ¿Qué es la digitalización de las infraestructuras?

De acuerdo con la OCDE (2019), la digitalización es: “(...) el uso de tecnologías y datos digitales, así como la interconexión que da como resultado actividades nuevas o cambios en

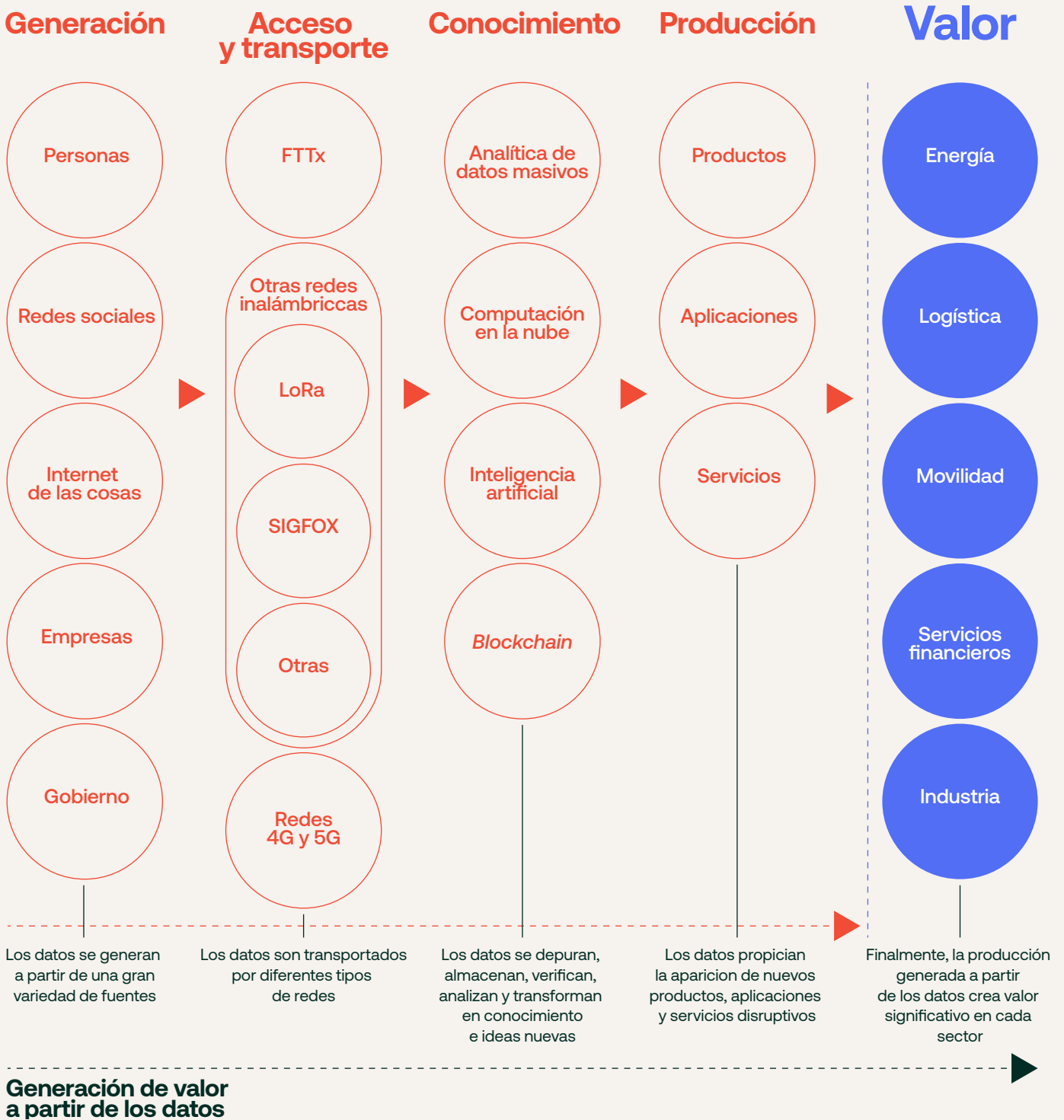
las actividades existentes”. A su vez, la transformación digital se refiere a: “(...) los efectos económicos y sociales de la digitalización”.

<sup>5</sup> Traducción libre del inglés.

<sup>6</sup> Traducción libre del inglés.

Figura 1.2 — La creación de valor a partir de procesos de digitalización

## Economía digital



En una primera aproximación, la digitalización parece concentrarse en los datos, los cuales están asociados a personas, empresas, gobiernos y las transacciones que realizan entre ellos. Sin embargo, los datos también pueden obtenerse por medio del internet de las cosas (IdC), 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 analizados mediante diversas tecnologías (IA, computación en la nube, analítica de datos y cadena de bloques), transformándose en conocimientos aplicados, ideas e inteligencia que habilitan nuevos productos, aplicaciones y servicios. De esta forma, se crea un valor significativo en cada sector de la economía, mejorando sus capacidades de planificación, gestión e innovación y beneficiando a los ciudadanos. Esta digitalización tiene muchas aplicaciones potenciales en diversos sectores de la economía, que van desde los servicios financieros y de salud hasta las interacciones de los ciudadanos con el gobierno. No obstante, este reporte se limita a la digitalización de las infraestructuras de los sectores de la electricidad, la movilidad y la logística.

Ese tipo de datos digitales representa en sí mismo un modelo del mundo que describe, informando qué y dónde comprar o vender; cómo producir y transportar de manera eficiente; cómo mantener contacto con los clientes; cuál es el estatus y la ubicación de las personas y cosas de interés, y permite proveer capacidades analíticas acerca de las necesidades actuales y futuras que facilitan la sostenibilidad y escalabilidad de los modelos de negocio.

La digitalización de la infraestructura viene acompañada de un conjunto de atributos clave, pero también de prerequisites para que puedan maximizarse sus beneficios, por ejemplo:

- **Conectividad.** Se requiere asegurar la disponibilidad de redes de acceso y transporte para que las personas y los objetos puedan conectarse.
- **Interoperabilidad,** mediante la estandarización de las conexiones, los protocolos, las plataformas y los sistemas.
- **Descentralización.** Algunos de los procesos de gestión y toma de decisiones pueden hacerse de forma independiente en subsistemas paralelos y separados.
- **Virtualización.** Capacidad de conectar sistemas físicos con modelos y simulaciones virtuales.
- **Capacidades en tiempo real** para facilitar los procesos de toma de decisiones y la gestión de la infraestructura y los activos.

Los procesos de digitalización de las infraestructuras de los que se habla en este reporte tienen una doble connotación: algunos hacen referencia al cierre de brechas en tecnologías tradicionales de la Tercera Revolución Industrial (típicamente de conectividad e interoperabilidad), pero que resultan esenciales para la consolidación de la digitalización; otros se refieren al surgimiento de nuevas tecnologías, aplicaciones y servicios. En muchos casos, estos procesos requieren de los dos componentes.

De esta manera, y en una aproximación más profunda, la digitalización es también el habilitador clave de las industrias de la Cuarta Revolución Industrial. Nutre innovaciones como el comercio electrónico, los servicios financieros por internet (*fintech*), la economía colaborativa, la automatización y robotización avanzada, la impresión tridimensional (3D), los drones y otros tipos de vehículos autónomos, las redes inteligentes (*smart grids*) y las cadenas de suministro globales.

En los términos de referencia de este estudio, CAF precisó que la digitalización de las infraestructuras debe entenderse en el sentido amplio de habilitación, mejora o transformación de los procesos de diseño, planificación, gestión y prestación de servicios. La Figura 1.3 muestra la comprensión de los procesos, tecnologías, objetivos y sectores de este estudio de digitalización de infraestructura.



Figura 1.3 — Niveles de análisis de la digitalización de la infraestructura en el estudio



# Nuevas tecnologías habilitantes de la digitalización

A continuación, se explica un conjunto de nuevas tecnologías habilitantes que caracterizan la transformación digital. Estas incluyen el internet de las cosas, las redes 5G, la computación en la nube, el *big data*, el *blockchain* y la IA. Sin embargo, como se ha señalado, la digitalización también

## Internet de las cosas

El internet de los objetos o internet de las cosas (IdC) es definido por la UIT como la “infraestructura mundial para la sociedad de la información que propicia la prestación de servicios avanzados mediante la interconexión de objetos (físicos y virtuales) gracias a la interoperatividad de tecnologías de la información y la comunicación presentes y futuras” (UIT, 2012).

Los objetos se dividen en dos categorías:

- 1 **Objetos físicos.** Son aquellos que existen en el mundo real y, por lo tanto, podemos percibirlos, manipularlos y conectarlos. Ejemplos de objetos físicos son los electrodomésticos, los interruptores, los vehículos de transporte, los teléfonos celulares, etc.
- 2 **Objetos virtuales.** Son los que existen en el mundo de la informática y como tal se pueden almacenar, procesar y acceder. Como ejemplos se pueden mencionar las aplicaciones, los contenidos multimedia, etc.

Aunque los objetos físicos se pueden representar en el mundo de la información por uno o varios objetos virtuales, estos últimos pueden existir sin tener asociado algún objeto físico (UIT, 2012).

La interacción entre el mundo físico y el mundo de la informática se realiza a través de dispositivos, que corresponden a equipos que siempre tienen la capacidad de comunicarse y opcionalmente pueden realizar funciones de detección, accionamiento, adquisición, almacenamiento y procesamiento de datos. Los dispositivos utilizan las redes de comunicación para transferir datos y recibir instrucciones de aplicaciones u otros dispositivos (UIT, 2012).

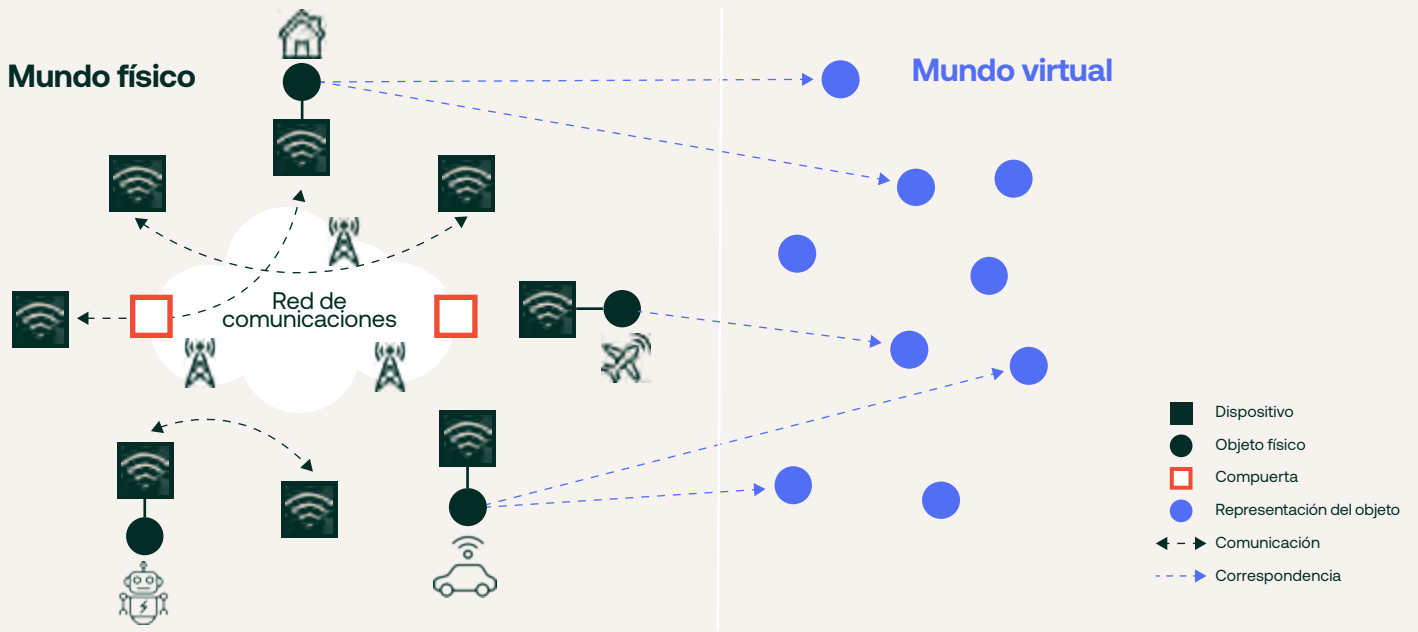
puede hacer referencia a procesos de cierre de brechas en cualquiera de las etapas de creación de valor a partir de los datos: generación, conectividad, conocimiento (incluyendo la interoperabilidad de los sistemas) y producción.

El modelo de referencia del IdC consta de cuatro capas y de capacidades de gestión y de seguridad que se relacionan con ellas (UIT, 2012).

El IdC permitirá la generación de una gran cantidad de nuevos modelos comerciales, aplicaciones y servicios que se soportarán en los datos recopilados a través de los dispositivos que interactúan con los objetos físicos. Las comunicaciones masivas entre máquinas son un subconjunto del IdC (OCDE, 2019).

El IdC facilita la digitalización de los sistemas de transporte y logística, las redes de suministro eléctrico, los monitores para verificar la salud, así como la puesta en marcha de vehículos autónomos y hogares inteligentes, entre otros campos de aplicación. Actualmente, el segmento de las empresas de servicios públicos es uno de los sectores donde más ejemplos prácticos se encuentran sobre el uso del IdC. Gracias a esta tecnología, las redes se encuentran interconectadas a través de dispositivos que les permiten tomar decisiones basadas en datos de forma automática y en tiempo real, con lo cual se mejora la confiabilidad y resiliencia de esas infraestructuras (OCDE, 2019).

Figura 1.4 — Descripción técnica del internet de las cosas



Fuente: Adaptado de la Recomendación UIT-T Y.2060 (UIT, 2012).

Figura 1.5 — Modelo de referencia del internet de las cosas



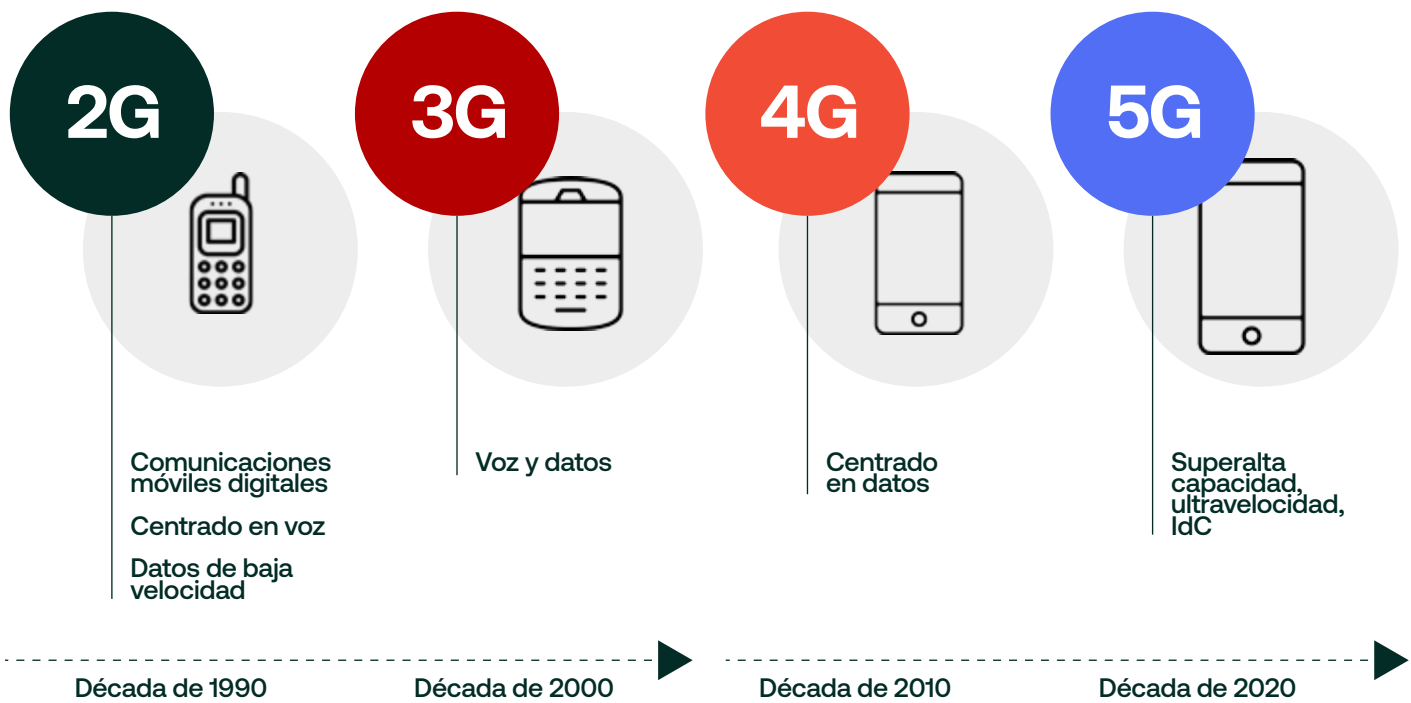
Fuente: Adaptado de la Recomendación UIT-T Y.2060 (UIT, 2012).

## Redes 5G

Las tecnologías de segunda generación (2G), como se muestra en la Figura 1.6, correspondieron al uso de los primeros sistemas digitales inalámbricos, desarrollados y desplegados primordialmente en la década de los noventa para la provisión de servicios de voz, sistemas de mensajes cortos de texto (SMS, por sus siglas en inglés) y datos de baja velocidad. Las tecnologías de tercera generación (3G) surgieron en la década siguiente. Su desarrollo tenía como principal objetivo permitir a los usuarios de las redes móviles una mejor experiencia en el uso de datos con mayor velocidad de acceso (UIT, 2003), mientras mantenía las capacidades de las redes para la provisión de servicios de voz. A su vez, las tecnologías de cuarta generación (4G) han tenido su desarrollo e implementación en la década de 2010. Su objetivo principal ha sido proporcionar servicios móviles inalámbricos

de datos a alta velocidad (UIT, 2018), soportados en redes IP<sup>7</sup> extremo a extremo, con mejoras sustanciales en las eficiencias espectrales y la adopción de técnicas de radio avanzadas. Es a partir del desarrollo de las redes 4G cuando las redes móviles han permitido un acceso eficiente a internet, lo que consolida un fenómeno denominado convergencia. Este fue definido en 2004 por la UIT como una “evolución coordinada de redes, que antes eran independientes, hacia una uniformidad que permita el soporte común de servicios y aplicaciones” (UIT-T, 2004). Sin embargo, esta definición está centrada en redes de telecomunicaciones y es insuficiente para explicar el cambio técnico, industrial, comercial y social que ha generado. La siguiente evolución tecnológica son las redes 5G, que permiten mayores velocidades de transmisión de datos y conectar no solo a las personas, sino también a los objetos (OCDE, 2019).

Figura 1.6 — Comparación simplificada de las tecnologías 2G, 3G, 4G y 5G



<sup>7</sup> Siglas en inglés por las que se conoce el protocolo de internet (*internet protocol*).

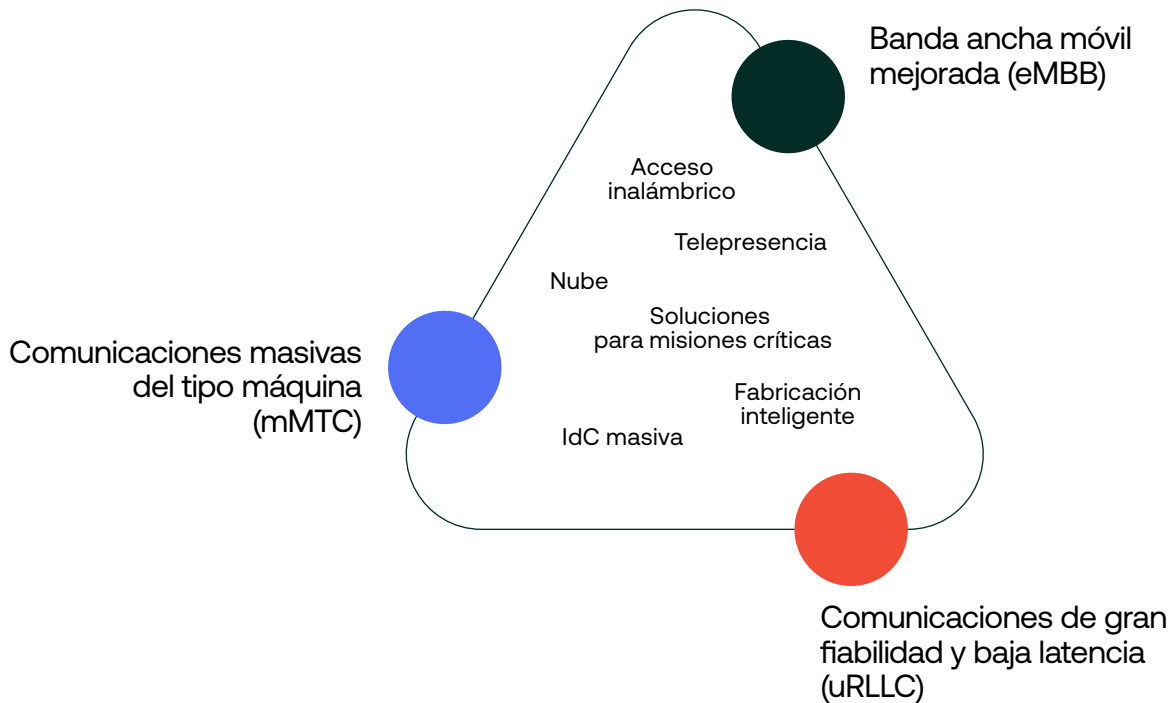
Según la recomendación UIT-R M.2083 (UIT, 2015a), los sistemas de telecomunicación 5G (o IMT-2020) se utilizarán principalmente para el despliegue de servicios que tengan las siguientes características:

- Banda ancha móvil mejorada (*enhanced mobile broad band* o eMBBB). Las redes para la prestación de servicios de contenidos multimedia y transmisión de datos a alta velocidad requerirán de mayores anchos de banda en las redes móviles y calidad del servicio.
- Comunicaciones de gran fiabilidad y baja latencia (*ultra reliable and low latency communications* o uRLLC). Las

comunicaciones orientadas a atender nuevos servicios, asociados con los automóviles autónomos, las redes de distribución eléctrica y las cadenas de montaje industrial, entre otros, se caracterizan por tener altos requisitos en términos de disponibilidad, velocidad y latencia.

- Comunicaciones masivas del tipo máquina (*massive machine type communication* o mMTC). Los servicios que se caracterizan por conectar un alto número de dispositivos transmiten pequeños volúmenes de datos que no son sensibles al retardo.

Figura 1.7 — Aplicaciones y servicios que soportarán las redes 5G



Las principales características técnicas de esta tecnología se presentan en el Cuadro 1.1.

Cuadro 1.1 — Capacidades teóricas de las redes 5G

Indicador	Definición	Unidad	Objetivo teórico
Tasa de transmisión de datos máxima	Tasa máxima de transmisión de datos bajo condiciones ideales por dispositivo o usuario	Gbit/s	20
Tasa de transmisión de datos percibida por los usuarios	Tasa de datos alcanzada y disponible en toda el área de cobertura por dispositivo o usuario	Mbit/s	100
Movilidad	Velocidad máxima a la cual se puede lograr una transferencia perfecta entre nodos de radio	km/h	100
Densidad de conexiones	Número total de dispositivos conectados por unidad de área	Dispositivos/km <sup>2</sup>	10 <sup>6</sup>
Capacidad de tráfico en el área	Cantidad de datos que se pueden transmitir por área geográfica por metro cuadrado	Mbit/s/m <sup>2</sup>	10
Eficiencia espectral	Cantidad de datos que en promedio se pueden transmitir por unidad de espectro	bit/s/Hz	3x
Eficiencia de energía de la red	Cantidad de datos que en promedio se pueden transmitir por unidad de energía	Bit/Joule	100x
Latencia	Contribución de la red de radio al tiempo que tarda un paquete desde que una fuente lo envía hasta que el destino lo recibe	ms	<1

Fuente: Elaborado a partir de Forge y Khuong (2020).

## Datos masivos (*big data*)

El concepto de macrodatos, datos masivos o *big data* comúnmente se asocia con grandes cantidades de datos que son generados, transmitidos y analizados. Estos datos son producidos por distintas fuentes, tales como sensores, cámaras, dispositivos de red, páginas web, correos electrónicos, redes sociales, bases de datos corporativas, IdC, etc. La multitud de fuentes y la capacidad de cada una hace que los conjuntos de datos se vuelvan tan grandes y complejos o que la velocidad en que se generan sea tan rápida que los métodos y herramientas de procesamiento tradicionales se vuelven inadecuados. Aunque estos datos pueden tener valor por sí mismos, la mayor parte de su riqueza proviene de la información que se puede extraer a partir de su procesamiento (OCDE, 2019).

Bajo este nuevo escenario, la recomendación UIT-T Y.3600 define al *big data* como un paradigma que permite la recolección, administración, análisis y visualización. Estas acciones pueden estar sujetas a restricciones de tiempo

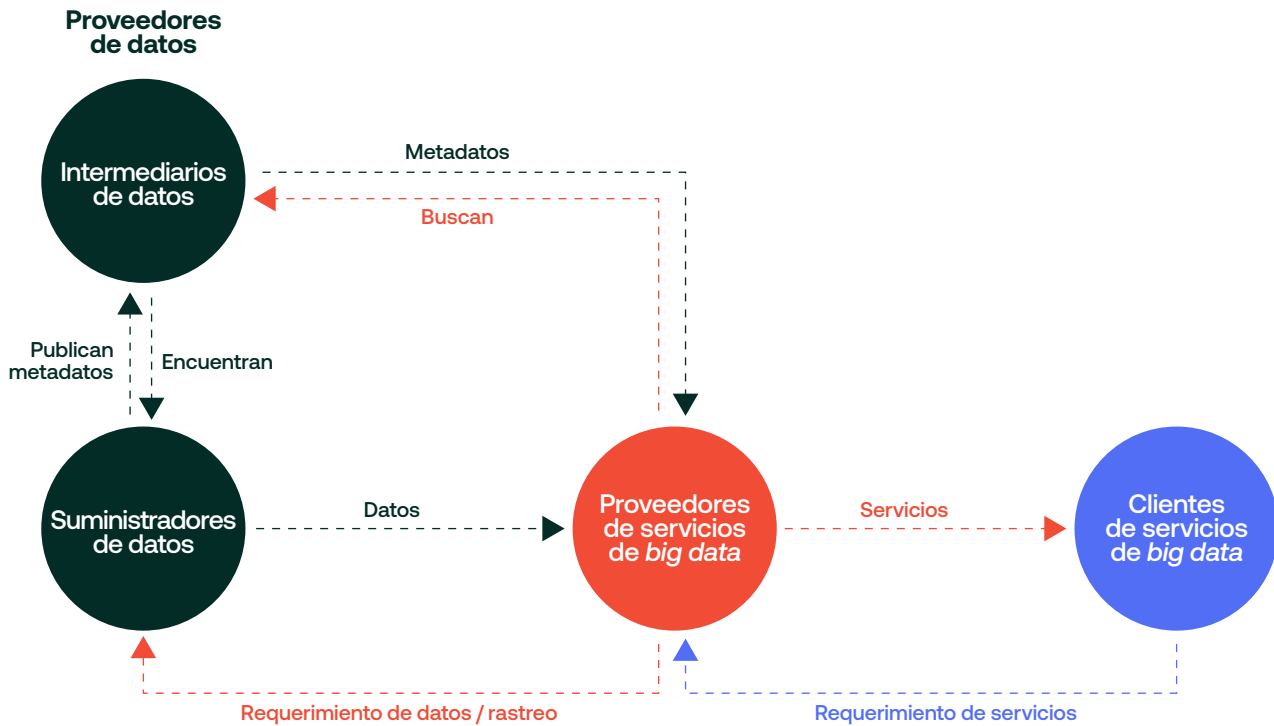
real y de conjuntos de datos de grandes volúmenes con características heterogéneas (UIT, 2015b).

Por su parte, el National Institute of Standards and Technology se refiere al *big data* como la incapacidad que las arquitecturas tradicionales de gestión de bases de datos tienen para manejar eficientemente los conjuntos de datos (Chang y Grady, 2015). El *big data* presenta las siguientes características:

- Volumen (por ejemplo, el tamaño del conjunto de datos).
- Variedad (por ejemplo, datos provenientes de múltiples repositorios, dominios o tipos).
- Velocidad (por ejemplo, la rapidez en que se generan y fluyen).
- Variabilidad (por ejemplo, cambios en otras características)<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Esta característica no está enunciada dentro de la Recomendación UIT-T Y.3600; sin embargo, la recomendación sí reconoce que se puedan considerar otras variables como características generales del *big data*.

Figura 1.8 — Ecosistemas del *big data*



Fuente: Adaptado de la Recomendación UIT-T Y.3600 (UIT, 2015b).

Esas características, que se conocen coloquialmente como las V del *big data*, dictaminan el diseño de nuevas arquitecturas para el análisis, procesamiento y ciclos de vida del procesamiento de los datos (Chang y Grady, 2015). Además, obligan a tener arquitecturas escalables para el eficiente almacenamiento, manipulación y análisis de los conjuntos de datos. De acuerdo con el NIST, existen fundamentalmente dos métodos para el escalamiento: vertical y horizontal.

El escalamiento vertical se refiere al incremento de los requerimientos de velocidad, almacenamiento y memoria para mejorar el desempeño en el procesamiento de los datos. Como tal, está limitado por capacidades físicas cuyas mejoras se describen por la ley de Moore. Por su parte el escalamiento horizontal se refiere al uso distribuido de recursos integrados para actuar como un solo sistema; en este tipo de escalamiento es donde está centrada la revolución del *big data* (Chang y Grady, 2015).

El ecosistema del *big data* está conformado por tres actores (UIT, 2015b):

- 1 Los proveedores de datos (PD), que se dividen en:
  - Suministradores de datos, los cuales generan datos y crean metadatos a partir de diferentes fuentes, información que es entregada a los intermediarios.
  - Intermediarios de datos, quienes proporcionan los datos de los suministradores a los proveedores de servicios de *big data*. Para realizar esta labor los intermediarios se encargan de encontrar las fuentes, registrarlas y describirlas para que los proveedores de servicios de *big data* puedan localizar los datos que serán utilizados en el procesamiento y análisis (UIT, 2015b).
- 2 Los proveedores de servicios de *big data*, quienes se encargan de mantener la infraestructura y los recursos para el procesamiento y el análisis de los datos. Su misión es buscar, recopilar, almacenar e integrar los datos, así como suministrar las herramientas que permiten el procesamiento y visualización tanto de los datos como de los resultados de

su procesamiento y análisis. También son responsables de apoyar las actividades relacionadas con la administración de los datos, tales como su procedencia, privacidad, seguridad, retención, propiedad, etc. (UIT, 2015b).

3 Los clientes de los servicios de *big data*, quienes utilizan los resultados obtenidos por los proveedores de dichos servicios para que otros actores, que no forman parte del ecosistema del *big data*, desarrollen nuevos servicios o creen conocimiento.

El *big data* tiene un potencial enorme en diferentes sectores económicos. A manera de ejemplo, el comercio minorista lo

utiliza para hacer sugerencias personalizadas a los clientes con base en sus patrones y hábitos de consumo; en el sector de la salud, las unidades neonatales monitorean los latidos del corazón y los patrones de respiración de los bebés prematuros y enfermos con el fin de predecir infecciones 24 horas antes de que muestren síntomas físicos; los gobiernos y las organizaciones de ayuda lo utilizan para desarrollar políticas que mejoren la educación y atención médica; los epidemiólogos, para identificar y rastrear brotes de enfermedades contagiosas (OCDE, 2019) y el sector del transporte, para apoyar los procesos operativos y de planeación del transporte público y vehicular (Oort y Cats, 2015).

## Computación en la nube

La computación en la nube es un modelo de servicio que brinda a los clientes acceso flexible y bajo demanda a diferentes recursos informáticos (OCDE, 2019). Existen varias definiciones de computación en la nube:

- De acuerdo con el NIST, la computación en la nube es un modelo que permite un acceso ubicuo, conveniente y bajo demanda a un conjunto compartido de recursos informáticos configurables (redes, servidores, almacenamiento, aplicaciones y servicios).
- La recomendación ITU-T Y.3500 lo presenta como un paradigma para permitir el acceso a un conjunto compartido de recursos de red físicos o virtuales por medio del autoaprovechamiento y la administración por demanda (UIT, 2014).

De acuerdo con la taxonomía adoptada por el NIST, se prestan tres tipos de servicio de computación en la nube, los cuales se presentan en el Cuadro 1.2.

La computación en la nube permite a los usuarios utilizar los recursos de manera escalable y adaptable, transformando costos fijos en costos marginales más bajos. Adicionalmente, la computación en la nube aumenta la asequibilidad, disponibilidad, capacidad y ubicuidad de los recursos informáticos, facilitando la implementación de otras tecnologías digitales, como la inteligencia artificial (IA), las máquinas autónomas, el *big data* y la impresión 3D (OCDE, 2019).

Cuadro 1.2 — Modelos de servicios de computación en la nube

Modelo de servicio	Definición y características del servicio
Software como servicio ( <i>software as a service</i> o SaaS)	El prestador del servicio permite el acceso a las aplicaciones demandadas por el usuario. El usuario accede a las aplicaciones mediante interfaces para clientes. El usuario no gestiona ni controla la infraestructura de la nube. El usuario tiene un control limitado (o nulo) sobre la configuración de las aplicaciones.
Plataforma como servicio ( <i>platform as a service</i> o PaaS)	El usuario cuenta con los permisos para ejecutar dentro de la infraestructura de la nube sus propias aplicaciones. El usuario no gestiona ni controla la infraestructura de la nube. El usuario tiene control sobre la aplicación desplegada y ocasionalmente sobre su configuración.
Infraestructura como servicio ( <i>infrastructure as a service</i> o IaaS)	El usuario cuenta con los permisos para el procesamiento, almacenamiento, acceso a la infraestructura y la utilización de otros recursos fundamentales de cómputo. El usuario puede ejecutar <i>software</i> de manera arbitraria, teniendo el control sobre el almacenamiento, los sistemas operativos y las aplicaciones. El usuario no controla la infraestructura de la nube. El usuario puede tener un control limitado sobre algunos elementos de red.

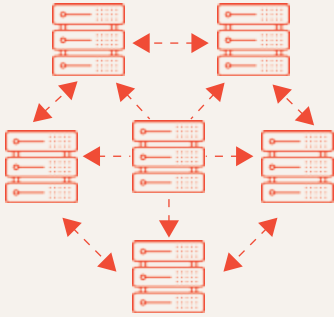
Fuente: Elaborado a partir de NIST (2011).



Figura 1.9 — Propiedades básicas de la cadena de bloques

## Descentralizada

Mediante redes P2P



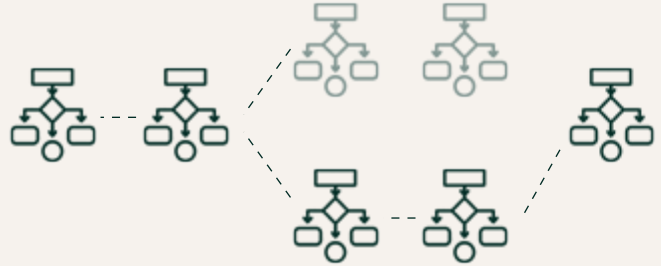
## Verificada

Mediante firmas



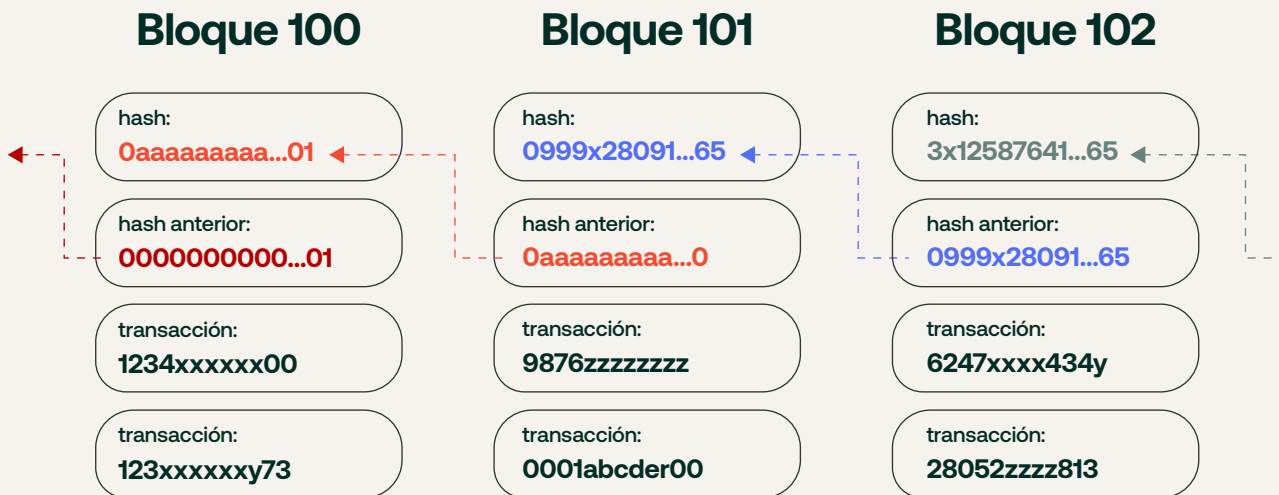
## Inmutable

Mediante algoritmos de consenso



Fuente: Elaborada a partir de Niels y Mortiz (2017).

Figura 1.10 — Modo de operación de la cadena de bloques



Fuente: Queiroz y Fosso (2019).

## Cadena de bloques (*blockchain*)

En esencia, la cadena de bloques es un registro digital distribuido de transacciones que no se puede alterar debido al uso de métodos criptográficos (Pilkington, 2016), como se muestra en la Figura 1.9. La cadena de bloques se caracteriza por tres propiedades: i) es descentralizada, porque la red no depende de una autoridad central o una infraestructura centralizada, sino que, para agregar una transacción, esta debe compartirse dentro de una red entre iguales (P2P, por sus siglas en inglés) de *blockchain* y todos los miembros conservan su propia copia local; ii) es verificada, porque los miembros firman las transacciones utilizando criptografía de clave público-privada antes de compartirlas con la red; sin embargo, los miembros pueden permanecer en el anonimato porque las claves no están vinculadas a identidades del mundo real; y iii) es inmutable, porque utiliza un algoritmo de consenso: una o más transacciones se agrupan para formar un nuevo bloque. Todos los miembros de la red pueden verificar las transacciones en el bloque. Si no se llega a un consenso sobre la validez del nuevo bloque, este se rechaza. Del mismo modo, si existe consenso en que las transacciones en el bloque son válidas, este se agrega a la cadena (Niels y Mortiz, 2017).

De esta manera se genera un *hash*<sup>9</sup> criptográfico para cada bloque, que no solo contiene registros de transacciones, sino también el *hash* del bloque anterior (ver Figura 1.10). Esto crea una interdependencia de bloques que se unen a una cadena: la cadena de bloques. La alteración de una transacción en la cadena de bloques de forma retroactiva requeriría no solo alterar los registros locales en la mayoría

de los dispositivos de los miembros de la red, sino también alterar el *hash* criptográfico de cada bloque en la cadena, lo que hace que las transacciones registradas sean sumamente seguras.

El gran beneficio de un sistema distribuido, como la cadena de bloques, es que proporciona exactamente la misma información verificada e inmutable a todos los miembros de la red, por lo que crea confianza entre las partes, eliminando la necesidad de que un tercero funja como intermediario confiable.

Las cadenas de bloques pueden ser públicas, llamadas también “sin permiso”, por lo que el acceso y la transferencia se producen entre partes que no se conocen entre sí (por ejemplo, el *bitcoin*). Además, pueden ser cadenas de bloques privadas o “autorizadas”, las cuales permiten el acceso y la transferencia entre partes específicas y se ejecutan mucho más rápidamente. Algunas cadenas de bloques pueden ejecutar *software* de manera descentralizada, sin la necesidad de la intervención de un operador central. Esto significa que algunas aplicaciones, a menudo conocidas como “contratos inteligentes”, pueden ejecutarse de una manera predefinida y estrictamente determinista. Si bien una de las aplicaciones más extendidas hasta ahora ha sido para la creación de criptomonedas, está comenzando a afectar a muchos otros sectores, incluidos la agricultura, la fabricación, el comercio minorista, la salud, la energía, el transporte y el sector público (OCDE, 2019).

## Inteligencia artificial

La IA está impulsada por el aprendizaje automático, también conocido por el término inglés *machine learning* (cuando las máquinas toman decisiones basadas en funciones de probabilidad derivadas de experiencias pasadas), el análisis de *big data*, la capacidad de procesamiento y la computación en la nube, lo cual permite procesar grandes cantidades de datos para la identificación de patrones. La IA promueve el desarrollo de *software* y robots que son cada vez más “autónomos” o semiautónomos, es decir que toman y ejecutan decisiones con poca o ninguna participación humana, y capaces de aprender, evolucionar y mejorar a lo largo de su ciclo de vida

para personalizar y optimizar su desempeño y rendimiento en función del análisis de los datos recopilados de su entorno.

La empresa Amazon define la IA en los siguientes términos: La inteligencia artificial es el campo de la ciencia informática dedicado a la resolución de problemas cognitivos asociados comúnmente con la inteligencia humana, como el aprendizaje, la resolución de problemas y el reconocimiento de patrones. (...). El profesor Pedro Domingos, investigador destacado en este campo, describe “cinco tribus” del aprendizaje virtual, compuestas por simbolistas, provenientes de la lógica y la filosofía;

<sup>9</sup> Por este término inglés se conoce una cadena de texto codificada (formada por números y letras de longitud fija y en un orden único e irreplicable que representan una serie de datos), creada mediante una función criptográfica única conocida como función *hash*.

conexionistas, procedentes de la neurociencia; evolutivos, relacionados con la biología evolutiva; bayesianos, interesados en la estadística y la probabilidad; y analogistas, procedentes de la psicología. Recientemente, los avances en la eficacia de la computación estadística han permitido a los bayesianos ampliar el campo en varias áreas, englobadas bajo el nombre de “aprendizaje automático”. Del mismo modo, los avances en la computación de red han llevado a los conexionistas a crear un subcampo denominado “aprendizaje profundo”. El aprendizaje automático (ML) y el aprendizaje profundo (DL) son campos de la ciencia informática derivados de la disciplina de la inteligencia artificial.

En rasgos generales, estas técnicas se dividen en técnicas de aprendizaje “supervisadas” y “no supervisadas”. Las técnicas “supervisadas” utilizan datos de entrenamiento que incluyen la salida deseada, mientras que las “no supervisadas” utilizan datos de entrenamiento sin la salida deseada.

La IA se vuelve “más inteligente” y aprende más rápido cuantos más datos posee y, cada día, las empresas están generando este combustible que pone en marcha las soluciones de aprendizaje automático y aprendizaje profundo, tanto recopilándolos y extrayéndolos de un almacén de datos (...) recopilándolos en el terreno (...) o extrayéndolos dinámicamente (...). Además, con el auge del IoT, la tecnología de los sensores añade cada vez más datos a la cantidad por analizar, datos de fuentes, lugares, objetos y eventos que antes prácticamente se ignoraban (Amazon, 2020)<sup>10</sup>.

Con la IA, las máquinas podrán ejecutar tareas repetitivas complejas que se creía que solamente podían realizar los humanos basados en la experiencia, la creatividad y el ingenio (UIT, 2017). Aunque su desarrollo traerá importantes beneficios a la humanidad, también conlleva importantes retos y preguntas sobre el futuro, en particular, de qué forma afectará al trabajo y las relaciones humanas (UIT, 2016).

## El COVID-19 y las tecnologías digitales

La digitalización de la infraestructura ha contribuido a mejorar la resiliencia frente a la pandemia causada por la enfermedad del coronavirus (COVID-19) y atenuar sus consecuencias negativas (CAF, 2020a).

La OCDE, en un análisis sobre el efecto de la pandemia del COVID-19 en Latinoamérica, identifica la digitalización como una oportunidad para una región que mostraba dificultades para salir del estancamiento. Según la organización, a pesar de los efectos negativos de las medidas para enfrentar la pandemia, los avances en la adopción de tecnologías digitales y la cobertura de internet fueron fundamentales para mantener cierta continuidad en los negocios, el empleo y la educación de manera remota, y las tecnologías digitales desempeñarán un papel importante en la fase de recuperación económica (OCDE, 2020; CAF, 2020a).

Sin embargo, como advierte el WEF (2020a), es necesario cerrar la brecha digital, cuyas consecuencias han sido aún más visibles con la pandemia. En todo el mundo, alrededor de 3.700 millones de personas no tienen acceso a internet, sobre todo en los países más pobres. Más de 1.000 millones de niños quedaron excluidos de las aulas debido a las medidas de cuarentena y, aun cuando algunos profesores impartían clases en línea, muchos de ellos simplemente no contaban con los medios que les permitieran participar (WEF, 2020a).

Entre las consecuencias de la pandemia, se resalta el impacto negativo que ha tenido en la contratación e inversión pública, lo que supone atrasos en los cronogramas y los costos de los proyectos. Estos efectos pueden verse mitigados con el uso de tecnologías digitales, ya que las entidades públicas podrían utilizar plataformas para adelantar procesos de contratación y permitir que los contratistas realicen trámites contractuales para la presentación y liquidación de sus facturas (#infraestructurasocovid, 2020).

Por otra parte, la pandemia ha demostrado que la seguridad energética sigue siendo una piedra angular de la economía. Por lo tanto, se debe asegurar la confiabilidad y resiliencia de los sistemas de energía (AIE, 2020a; WEF, 2020b), objetivos que son perseguidos con la implementación de tecnologías de redes inteligentes (*smart grids*), tales como la infraestructura de medición inteligente (*advanced metering infrastructure* o AMI), la automatización de la red de distribución (*advanced distribution automation* o ADA) y los recursos de energía distribuidos (*distributed energy resources* o DER). Estas tecnologías se presentan de forma detallada en la sección “Caracterización del uso de las tecnologías digitales en el sector de energía” del Capítulo 3.

Con respecto al sector de la movilidad, las empresas han tenido cambios sustanciales en sus paradigmas de lugar y modo de trabajo. Esto ha impulsado la adopción

<sup>10</sup> Los acrónimos ML, DL y IoT mencionados en la cita corresponden a las siglas en inglés de aprendizaje automático, aprendizaje profundo e internet de las cosas.

del teletrabajo, así como la automatización de diferentes procesos a través de la robótica y el desarrollo de plataformas, herramientas y técnicas digitales e informáticas (Goodwin y Wigersma, 2020). De esta forma, ha aumentado la demanda de soluciones digitales para garantizar la continuidad de las actividades económicas, educativas y sociales de forma remota. En particular, la adopción del teletrabajo depende de una serie de factores que incluyen: i) la disponibilidad de conectividad de banda ancha, ii) la disponibilidad de recursos informáticos en el hogar, iii) la habilidad digital que tengan los trabajadores y iv) la posibilidad de realizar sus labores desde casa. Estos factores varían considerablemente entre las diferentes regiones de América Latina, lo cual, sumado a la gran cantidad de población que realiza trabajo informal, reduce la posibilidad de adoptar el teletrabajo como medida de mitigación del virus (García Zaballos et al., 2020).

Por otra parte, en Europa el distanciamiento social impuesto por la crisis sanitaria ha llevado a varias ciudades a ofrecer a sus ciudadanos nuevas formas de viajar. El objetivo es evitar las aglomeraciones en el transporte público y un uso excesivo del automóvil particular, incentivando el uso de modos alternativos de transporte. Por ejemplo, en Turín, el flujo de bicicletas aumentó un 6,9 % en agosto, en comparación con el mismo período en 2019. Sin embargo, esta revolución de los modos de movilidad también ha provocado un aumento de los siniestros de tráfico con peatones y ciclistas (Comisión Europea, 2020). Como se expone en la sección “Caracterización del uso de las tecnologías digitales en el sector de la energía”, la incorporación de tecnologías que permiten la comunicación entre vehículos y entre estos y la infraestructura (V2V y V2I, por sus respectivas siglas en inglés) puede ayudar a la prevención de siniestros de tránsito, por ejemplo, generando alertas para preservar la vida de ciclistas y peatones.

En el sector de la logística, la pandemia ha generado una revolución impulsada por la tecnología. Las empresas con sólidas capacidades digitales para realizar tanto la trazabilidad de las mercancías y cargas como para hacer negocios en línea han obtenido ventajas competitivas. Esto implicaría un aumento de las inversiones de corto plazo en tecnologías como el IdC, la computación en la nube, la automatización y la analítica de datos. A largo plazo, la robótica, los drones y los vehículos autónomos podrían reducir la exposición de los proveedores de servicios logísticos a la escasez de mano de obra ocasionada por las políticas orientadas a mitigar los efectos de la pandemia (IFC, 2020).

Teniendo en cuenta lo anterior, la digitalización puede desempeñar un papel fundamental en la mitigación de dichos efectos. Por lo tanto, es importante que los gobiernos, el sector privado y la sociedad civil latinoamericana conformen un acuerdo de colaboración y trabajo conjunto que permita identificar aquellas áreas donde se pueden mejorar ciertos componentes del ecosistema digital (CAF, 2020b).

# Aspectos generales de la metodología beneficio-costo

Digitalizar es capturar una señal análoga y convertirla en una representación digital susceptible de ser procesada y almacenada. Con la digitalización, la información está disponible todo el tiempo, en cualquier lugar y para cualquier usuario que cuente con el equipo y el tipo de acceso adecuado. Cuanto mejor sea la información capturada y procesada de las transacciones, cuantos más equipos cuenten con algún nivel de inteligencia y más conectados estén entre ellos, mayor será el nivel de digitalización de la red o de la cadena de suministro en un proceso particular. La digitalización permite conectar, integrar, monetizar y compartir cualquier dato, equipo, sistema o proceso en tiempo casi real en la economía digital. Conectar sistemas añade valor. Los sistemas adquieren la capacidad de tomar decisiones en forma autónoma y descentralizada en los distintos equipos conectados a la red (Kayikci, 2018).

La digitalización está transformando completamente la forma en que se planifican, diseñan y gestionan las infraestructuras en los sectores de la energía eléctrica, la movilidad y la logística. Como se discute en este documento, la transformación de estos sectores se traduce en ganancias enormes de eficiencia para la economía y los proveedores de los servicios y en

mejoras en la calidad de vida de los usuarios. No obstante, migrar hacia sistemas digitales genera costos importantes. Los procesos de digitalización son intensivos en el uso de capital (sensores, *hardware*, *software*, equipos de control, conectividad) y recursos humanos con niveles elevados de capacitación. Para determinar el grado óptimo de penetración de la digitalización en las infraestructuras de estos sectores en América Latina conviene aplicar caso a caso la metodología de análisis costo-beneficio a los proyectos que involucran componentes de ese tipo. Es importante estimar si los beneficios de la digitalización de la infraestructura para la sociedad superan sus costos.

En este documento se identifican los beneficios y costos que conlleva la digitalización de la infraestructura en los sectores de la electricidad, la movilidad y la logística. El propósito de este análisis es dotar de elementos de juicio a los ejecutivos de CAF y sus contrapartes en los países para la toma de decisiones en torno a la conveniencia, dimensionamiento y estructuración de los componentes de digitalización en los proyectos. De igual forma, los análisis compilados en este documento sirven de base para la estructuración del modelo beneficio-costo y su aplicación a los proyectos de CAF.

## El análisis beneficio-costo a nivel conceptual

El análisis costo-beneficio (B/C) es un método de evaluación que expresa en términos monetarios las consecuencias de una política para los miembros de la sociedad<sup>11</sup>. Con esta metodología se comparan los impactos positivos y negativos de un proyecto en la economía, lo que permite soportar la toma de decisiones con bases objetivas. El análisis B/C determina si cada proyecto, visto de manera aislada, genera una rentabilidad

económica y social superior al costo de oportunidad de los recursos públicos invertidos. Si la respuesta es afirmativa, el proyecto va a añadir valor y conviene seguir adelante con su ejecución; en caso contrario, es mejor abstenerse y liberar los recursos para atender otras iniciativas de mayor impacto socioeconómico (de Rus, 2010).

<sup>11</sup> Los beneficios del proyecto se estiman en términos de utilidad, un concepto abstracto ideado por los economistas para modelar el comportamiento de los consumidores y medir el bienestar de las sociedades. Para comparar los beneficios con los costos es necesario acudir a un numerario común, en este caso las unidades monetarias. En otras palabras, se trata de comparar flujos de utilidad, expresados en dinero, con flujos de costos, que en la práctica se materializan directamente en dinero.

Un proyecto se puede concebir como una perturbación de la economía<sup>12</sup>. En ausencia del proyecto, la economía se desenvuelve en determinada senda de equilibrio, en la que los factores (trabajo, capital y tierra) se distribuyen entre los distintos sectores guiados por sus productividades marginales; la población, que recibe ingresos de estos factores, toma sus decisiones de inversión y ahorro con base en sus preferencias intertemporales y establece sus patrones de consumo a partir de los precios y su función de utilidad; y el Estado fija un nivel de impuestos y deuda y destina los recursos recaudados a financiar bienes públicos.

La evaluación de B/C pretende establecer cómo la realización de determinado proyecto altera ese equilibrio. La ejecución implicará reorientar parte de los factores de las actividades actuales hacia el proyecto<sup>13</sup>. Por su parte, el proyecto incrementa la oferta de bienes o servicios y con ello eleva la utilidad agregada que percibe la población. El proyecto altera el equilibrio en los mercados donde se desenvuelven estos agentes como consumidores, dueños de factores, contribuyentes y receptores de externalidades. El B/C trata de inferir si, de forma agregada, los agentes estarán mejor o peor una vez que se realice el proyecto.

## Estimación de los beneficios económicos: el excedente social generado por los proyectos

El concepto de excedente social (CS) es una aproximación teórica al bienestar económico de la sociedad (de Rus, 2010). Se formaliza en la siguiente ecuación: el excedente social equivale a la suma de los excedentes que extraen de sus actividades económicas cinco grupos no excluyentes de la población<sup>14</sup>. El primer grupo son los consumidores; el excedente del consumidor (EC) se mide como la diferencia entre el valor que los consumidores están dispuestos a pagar y el precio que efectivamente pagan, agregado a todas las unidades consumidas en el mercado. Se trata de un excedente porque el individuo obtiene una utilidad mayor que el precio que está pagando por el bien<sup>15</sup>. El segundo término captura el excedente de los contribuyentes (GS) y se define como el recaudo tributario menos el gasto público, es decir, corresponde al ahorro del sector público. El excedente del productor o de los dueños del capital (PS) se estima como los ingresos de las firmas descontados los gastos variables. El excedente de los trabajadores (LS) se entiende como la masa de salarios netos del umbral por debajo del cual no están dispuestos a ofrecer su mano de obra. El excedente de los terratenientes (RS) equivale a los pagos por renta del suelo (alquileres) tras deducir el precio mínimo de reserva que aceptarían los propietarios por

ceder el uso del suelo. Finalmente, se deben considerar las externalidades (EX), es decir los efectos externos del proyecto, positivos o negativos, sobre los grupos de población.

$$SS = CS + GS + PS + LS + RS + EX$$

El cambio en el bienestar inducido por el proyecto se estima como la suma de las variaciones en los excedentes de cada grupo ( $\Delta$ ), descontados a la tasa social ( $\delta$ ).

$$\Delta SS = \sum_{t=0}^T \frac{\Delta CS_t + \Delta GS_t + \Delta PS_t + \Delta LS_t + \Delta RS_t + \Delta EXS_t}{(1+\delta)^t}$$

En una economía donde los factores se remuneran en niveles que reflejan su costo de oportunidad, no es necesario considerar el efecto del proyecto sobre los trabajadores y los dueños de la tierra. El proyecto desplaza los recursos de un uso a otro, pero los dueños de los factores reciben en cualquier caso la misma remuneración y por lo tanto el cambio en el excedente es cero<sup>16</sup> ( $\Delta LS = \Delta RS = 0$ ). Si se asume,

<sup>12</sup> Esta sección del marco teórico está basada en el texto de De Rus (2010).

<sup>13</sup> En general la evaluación económica se basa en un análisis parcial de estática comparativa, concentrado exclusivamente en el mercado en el que se desenvuelve el proyecto. Se trata de inferir cómo se desplazaría el equilibrio entre la oferta y la demanda en respuesta a la ejecución del proyecto. Esta aproximación opera bajo un supuesto según el cual el proyecto no tiene el tamaño suficiente para alterar otros mercados de la economía, como el mercado laboral o el mercado de capitales.

<sup>14</sup> Un individuo puede pertenecer a más de un grupo.

<sup>15</sup> Esto es cierto excepto para el comprador marginal, aquel para el cual la utilidad marginal por consumir el bien equivale exactamente al precio. Aquellos individuos que valoran el bien por encima del comprador marginal obtendrán un excedente del consumidor positivo. Los que tienen una valoración inferior, no compran el bien.

<sup>16</sup> El proyecto no tiene la magnitud necesaria para afectar los niveles de salarios, la renta del suelo, la tasa de interés o la posición cambiaria del país.

adicionalmente, que el proyecto no altera el balance fiscal, porque, por ejemplo, el gasto en capital y el gasto operacional (CAPEX y OPEX) se recuperan con cargos a los usuarios ( $\Delta GS = 0$ ), el impacto del proyecto se simplifica<sup>17</sup>:

$$\Delta SS = \sum_{t=0}^T \frac{\Delta CS_t + \Delta PS_t}{(1+\delta)^t}$$

Los beneficios del proyecto se estiman como la suma de los cambios en los excedentes del consumidor y del productor que genera el proyecto, descontados a la tasa social. Alternativamente, el beneficio se puede aproximar como la suma de los cambios en la disponibilidad a pagar neta del cambio en el uso de los recursos económicos.

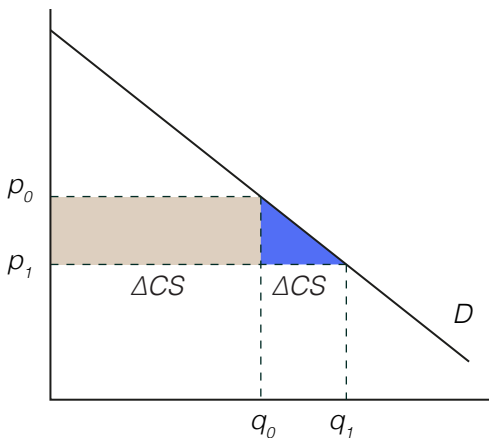
El tratamiento microeconómico para medir los excedentes del consumidor y del productor depende del impacto del proyecto en la oferta y la forma funcional de la demanda. En la práctica, no obstante, la mayoría de los manuales de evaluación de proyectos simplifican los cálculos considerando economías constantes a escala (oferta perfectamente elástica), una función de demanda lineal y mercados competitivos, donde

el precio iguala el costo marginal (el productor no captura excedentes). En esta configuración, basta contar con una estimación del efecto del proyecto en los precios finales y la reacción de la demanda ante esta variación de precios para determinar los beneficios económicos. Los consumidores capturan un excedente asociado con la reducción del precio desde  $p_0$  hasta  $p_1$ , valorado en el nivel actual de consumo,  $q_0$  (rectángulo gris en la Figura 2.1). También capturan un beneficio, asociado con el diferencial entre su disponibilidad a pagar y el precio para la demanda incremental inducida por el proyecto ( $q_1 - q_0$ ) (triángulo azul en la misma figura).

El cálculo del beneficio bajo estos supuestos se simplifica con la denominada “regla del medio” (*rule of half*), según la cual la variación del excedente del consumidor inducida por el proyecto se descompone en el ahorro en costos estimado sobre los consumos actuales y un valor medio de la variación en la demanda, multiplicado por el diferencial de costos<sup>18</sup>.

$$\Delta CS = (p_0 - p_1)q_0 + \frac{1}{2}(p_0 - p_1)(q_1 - q_0) = \frac{1}{2}(p_0 - p_1)(q_1 + q_0)$$

Figura 2.1 — Simplificación de la estimación de beneficios bajo la “regla del medio”



Fuente: Basado en De Rus (2010).

17 Si la ejecución del proyecto incide en las externalidades, se debe incorporar un término para capturar su variación entre las situaciones con y sin proyecto. Como se discute más adelante, este caso es muy común en los proyectos de digitalización en el sector de la movilidad, donde se reduce la emisión de contaminantes.

18 La derivación de esta fórmula asume que la demanda es lineal y con pendiente -1.

# Valor económico del tiempo: tasa social de descuento

Los flujos de beneficios y costos del proyecto no se distribuyen en forma homogénea en cada año del horizonte de análisis. Para determinar si los beneficios exceden los costos es necesario traer los flujos a un momento en el tiempo de forma que sean comparables. Para ello, los flujos se descuentan con la tasa social, que determina el costo de oportunidad de los recursos públicos. La tasa social permite descontar los flujos de costos y beneficios haciéndolos comparables en un momento dado. En el cálculo de la tasa de descuento intervienen tres conceptos:

- **Tasa marginal de preferencia intertemporal.** Puesto que la utilidad marginal del ingreso es decreciente y el ingreso medio de la población aumenta de un año a otro, el consumo de determinada unidad de un bien genera mayor utilidad en el presente que en el futuro. El parámetro de descuento está asociado con el nivel de ingreso de las sociedades. Economías de bajos ingresos castigan con mayor énfasis la necesidad de postergar el consumo hacia el futuro. También inciden factores culturales, ya que algunas sociedades son más pacientes que otras en sus aspiraciones de consumo.
- **Costo de oportunidad social del capital.** El proyecto implica el desvío de recursos empleados en otras actividades económicas. Parece sensato imputar la rentabilidad promedio que genera el capital en la economía a la tasa de descuento<sup>19</sup>.
- **Tasa de endeudamiento del gobierno.** Finalmente, el proyecto se puede financiar con un mayor endeudamiento externo. En este caso, el proyecto debe generar una tasa de retorno que por lo menos iguale el costo de la deuda externa incremental.

Harberger (1967) plantea un sistema de ponderadores que permite, a partir de estos tres criterios, calcular la tasa social de descuento relevante para la evaluación de proyectos con recursos públicos. A partir de modelos macroeconómicos es posible inferir si un proyecto adicional se traducirá en una reducción del consumo, un sacrificio de la inversión privada o sencillamente en mayor endeudamiento externo. En la práctica, el aumento en el gasto fiscal presiona cada uno de estos agregados macroeconómicos, con lo cual se trata de establecer en qué proporción:

- el porcentaje de reducción del consumo constituye el ponderador de la tasa marginal de preferencia intertemporal;
- el porcentaje de reducción en la inversión privada constituye el ponderador del costo de oportunidad social del capital;
- el porcentaje de endeudamiento externo constituye el ponderador del costo incremental de la deuda externa.

El Cuadro 2.1 presenta la metodología de cálculo y las tasas sociales de descuento que se aplican en una muestra de países<sup>20</sup>. En ellas se observa que los países desarrollados aplican tasas más bajas. En estas economías se castiga menos la postergación del consumo, el capital genera menores rendimientos y se tiene un acceso más favorable a los mercados internacionales de crédito y capital. Los países en desarrollo se ubican en el rango elevado del cuadro. Perú, México y Chile, que han reestimado el parámetro recientemente, hicieron un ajuste a la baja y aplican, respectivamente el 10 %, el 9 % y el 6 %, mientras que en los otros países latinoamericanos es del 12 %. En algunos países desarrollados se consideran tasas aún más bajas que las reportadas en el cuadro para descontar los flujos de proyectos con gran impacto ambiental<sup>21</sup>.

<sup>19</sup> Por ejemplo, tomando de las cuentas nacionales el excedente bruto de explotación como proporción del *stock* de capital de la economía. Existen técnicas para construir una estimación del *stock* de capital de la economía a partir de la acumulación de inversiones en el pasado, considerando una tasa de depreciación por cada tipo de activo.

<sup>20</sup> Ver Campos et al. (2015).

<sup>21</sup> Los efectos ambientales persisten a muy largo plazo. Si se aplican tasas elevadas para descontar los efectos del proyecto sobre la naturaleza, en la práctica, la ponderación de la variable ambiental se torna irrelevante.



Cuadro 2.1 — Tasas de descuento social en países o bloques económicos dentro y fuera de América Latina

País	Tasa social de descuento recomendada	Año de actualización
Argentina	12,00 %	1996
Bolivia	12,67 %	2006
Chile	6,00 %	2020
Colombia	9,00 %	2018
Costa Rica	8,31 %	2019
Estados Unidos	7,00 %	2017
Filipinas	10,00 %	2016
México	10,00 %	2015
Nueva Zelanda	8,00 %	2014
Paraguay	Entre 6,5 % y 10,4 %	2017
Perú	8,00 %	2017
Reino Unido	3,50 %	2018
Unión Europea	5,00 %	2014
Uruguay	7,50 %	2014

Fuentes: Para Argentina, Secretaría de Programación Económica (1996); para Bolivia, Ministerio de Planificación del Desarrollo (2006); para Chile, Ministerio de Desarrollo Social y Familia (2021); para Colombia, Piraquive et al. (2018); para Costa Rica, Mideplan (2019); para Estados Unidos, Broughel (2017); para Filipinas, Zuniga et al. (2020); para México, Secretaría de Hacienda y Crédito Público (2014); para Nueva Zelanda, ASEC (2014); para Paraguay, Contreras (2017); para Perú, MEF (2017); para Reino Unido, Ministerio de Economía (HM Treasury, 2020); para la Unión Europea, Comisión Europea (2014); para Uruguay, Oficina de Planeamiento y Presupuesto (2014).

## Costo de oportunidad de los recursos invertidos (precios sombra)

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 y fallas de mercado. Los precios sombra o precios de cuenta<sup>22</sup> se construyen precisamente para corregir los precios de mercado de forma que reflejen el verdadero costo

de oportunidad de los bienes y factores para la economía. En la medida en que las economías son cada vez más abiertas y están expuestas a menores intervenciones, los precios y salarios convergen a sus respectivos costos de oportunidad y las correcciones por precios de cuenta dejan de ser indispensables.

22. Por estos nombres se conoce el precio de referencia que tendría un bien determinado en condiciones de competencia perfecta, incluyendo los costos sociales y los privados.

En algunos países las oficinas de planeación actualizan los factores de conversión a precios de cuenta, de manera que los analistas puedan traducir a precios de eficiencia los flujos obtenidos a precios de mercado. Cuando no se dispone de estos parámetros, conviene en todo caso hacer algunos ajustes a los flujos con valores de mercado. Así, por ejemplo, los impuestos no representan un costo económico; se trata de una transferencia de los agentes privados hacia el sector público y no del uso final de los recursos<sup>23</sup>. Si la economía enfrenta

restricciones cambiarias, es necesario ajustar el componente importado de los proyectos de acuerdo con el verdadero costo de oportunidad de las divisas. En economías con desempleo, un porcentaje de la mano de obra contratada para ejecutar las obras con alguna probabilidad proviene de trabajadores desempleados, cuyo costo de oportunidad puede ser cercano a cero. En este caso conviene corregir los salarios de mercado para construir los flujos de costos.

## Pasos de la evaluación

### Objetivo del proyecto y definición de las alternativas relevantes

Idealmente, los proyectos deben concebirse como la solución a un problema específico (por ejemplo, pérdidas elevadas, baja eficiencia, cuellos de botella, baja competitividad, aislamiento, tiempos excesivos de viaje, baja confiabilidad). Es decir, es necesario definir cuál es el problema que se quiere resolver como un paso previo para determinar la forma de hacerlo. Una vez identificado el problema, se deben buscar posibles soluciones o formas alternativas de solucionarlo. Cada alternativa constituye, entonces, un proyecto a evaluar. Si se sigue este procedimiento, no solo se asegura que los recursos se orienten a resolver problemas cuya solución es prioritaria, sino también que la solución planteada corresponda a la alternativa más eficiente desde el punto de vista económico.

En particular, la digitalización puede constituir una opción más intensiva en capital para alcanzar metas de eficiencia en cada

uno de los respectivos sectores. Es conveniente plantear el proyecto alternativo que busca alcanzar estos objetivos a partir de las tecnologías tradicionales, de forma que se cuente con un contrafactual que permita trazar la línea de base del suministro del servicio en un esquema de mantenimiento del *status quo*.

En general, pero sobre todo en los proyectos de transporte, los beneficios se obtienen de comparar los costos del servicio en las situaciones con y sin proyecto. De esta forma, si se sobrestiman los costos en ausencia del proyecto, se estarán imputando beneficios excesivos al proyecto. Es importante que la línea de base refleje la situación sin proyecto, que no necesariamente corresponde a un escenario de inactividad por el responsable de la infraestructura.

### Identificación de los costos y beneficios

El siguiente paso consiste en identificar cuáles son los costos y beneficios. Como se discutió en el apartado anterior, es necesario identificar la dirección y magnitud de los cambios en los excedentes de los consumidores y los productores; las externalidades positivas o negativas del proyecto sobre terceros, y el impacto en las finanzas públicas. De igual forma,

se debe establecer el costo del proyecto en términos de movilización de recursos económicos (bienes y factores).

Este reporte presenta una aproximación metodológica para la estimación de beneficios y costos en los proyectos de infraestructura en los sectores de la energía eléctrica,

<sup>23</sup> A pesar de que los impuestos constituyen una transferencia entre agentes y no un costo, es importante tener en cuenta que el sistema impositivo genera distorsiones en la economía que la alejan de su potencial. Estas distorsiones son necesarias para ofrecer a la población bienes públicos, pero es conveniente medirlas. El costo marginal de los fondos públicos (CMFP) se obtiene analizando el sacrificio en generación de valor agregado que impone la elevación de las tasas tributarias en modelos de equilibrio general. Este parámetro es útil para, por ejemplo, estimar los beneficios de un proyecto que reduce la necesidad de entregar subsidios. Se reduce una transferencia del sector público al privado lo que, en principio es neutro para la economía. No obstante, al reducir la presión fiscal, también disminuyen las distorsiones del sistema tributario sobre la economía con un impacto positivo en el bienestar estimado dado por el CMFP.

la movilidad y la logística que involucran componentes de digitalización. Los conceptos de medición planteados se incorporan cuando se aplica la metodología B/C a proyectos de

CAF que incluyen componentes de digitalización, expuestos en los tres documentos complementarios<sup>24</sup>.

## Interpretación de los resultados y criterios de decisión

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: el valor presente, la tasa interna de retorno y la relación beneficio–costo.

El valor presente neto (VPN) se calcula como la suma descontada de los beneficios (B) netos de costos (C) en el horizonte de análisis (T). Puesto que los flujos se descuentan con la tasa social (r), que refleja el costo de oportunidad de los recursos públicos, si el VPN es positivo, la ejecución del proyecto es conveniente para la economía. En ese sentido, el VPN es un indicador contundente para determinar la bondad de los proyectos. No obstante, su capacidad para priorizar proyectos dentro de una lista de iniciativas evaluada es limitada porque arroja valores absolutos. Es decir, un proyecto puede generar un VPN mayor que otro porque el volumen de recursos movilizados es mayor y no necesariamente porque sea más rentable en términos económicos y sociales.

$$VPN = \sum_{i=0}^T \frac{B_i - C_i}{(1+r)^i}$$

Un indicador que no depende del volumen de recursos movilizado por el proyecto y que, por lo tanto, es útil para priorizar proyectos cuando se enfrenta una restricción presupuestaria es la tasa interna de retorno (TIR). Esta se define como la tasa a la cual el valor presente neto del proyecto es igual a cero. La TIR expresa la rentabilidad económica de los recursos que se destinan al proyecto. Cuando la TIR es superior a la tasa de descuento, el VPN es positivo y, por lo tanto, la ejecución del proyecto es conveniente para la economía. A pesar de su poder como indicador para establecer el orden de prioridad en una lista de proyectos, es necesario tomar dos precauciones

en el cálculo y aplicación de la TIR. En primer lugar, la solución matemática de la TIR no siempre es única. El analista puede tomar decisiones erradas si la TIR estimada por el modelo no corresponde a la solución dentro de los rangos relevantes del proyecto<sup>25</sup>. En segundo lugar, la TIR supone que los excedentes que genera el proyecto se reinvierten a esa misma tasa. En muchos proyectos esto no es posible, con lo cual se puede sobrestimar la verdadera rentabilidad del proyecto.

$$\sum_{i=0}^T \frac{B_i - C_i}{(1+TIR)^i} = 0$$

Finalmente, la relación B/C se calcula como el cociente entre el VPN de los beneficios y el VPN de los costos. Cuando la relación es mayor que 1, el VPN del proyecto es positivo y la TIR supera la tasa de descuento. En estos casos, conviene ejecutar el proyecto. Si los recursos disponibles no son suficientes para financiar todos los proyectos con B/C>1, se pueden aplicar reglas para priorizar los proyectos hasta agotar los recursos disponibles para inversión a partir del aporte marginal de cada proyecto en los beneficios por recurso invertido.

$$\frac{B}{C} = \sum_{i=0}^T \frac{B_i/C_i}{(1+r)^i}$$

Además de estos tres indicadores básicos de evaluación, se han construido indicadores para determinar si un proyecto se debe acometer inmediatamente o conviene postergar su entrada en operación. En particular, la puesta en marcha de un proyecto es conveniente en el año en que los beneficios netos de costos superen la tasa de descuento: (B-OPEX) > r(CAPEX). El primer año en que se cumpla esta desigualdad, conviene iniciar el proyecto (Económica Consultores, 2016).

## Análisis de sensibilidad

La estimación de los beneficios y costos se estructura sobre algunos supuestos del comportamiento de variables que no están bajo el control de quien ejecuta el proyecto. El

crecimiento demográfico, el comportamiento de la actividad económica, la evolución futura del precio de los factores, como los salarios, la tasa de interés o la tasa de cambio,

<sup>24</sup> Los documentos que complementan este reporte, presentados como anexos, están disponibles en la Scioteca de CAF.

<sup>25</sup> En términos matemáticos, la TIR es una raíz de un polinomio de grado T. El número de raíces reales o imaginarias es igual al grado del polinomio.

influyen en los resultados del proyecto y no es posible anticiparlos con precisión. Por ello, conviene llevar a cabo un análisis de sensibilidad para determinar qué tan robustos son los indicadores del proyecto ante escenarios ácidos del comportamiento de las variables externas.

El valor agregado de los ejercicios de B/C no se limita al cálculo de los indicadores de la evaluación. También se exploran las alternativas para lograr los objetivos planteados, se valoran diferentes dimensiones para los equipos, se estudia la generación de beneficios y su forma de estimarlos y se investiga la oferta de equipos alternativos y los costos asociados. Estos esfuerzos, organizados alrededor de una evaluación de B/C, sin duda contribuyen a la especificación del proyecto y permiten fundamentar, sobre bases objetivas, las decisiones sobre si es conveniente seguir adelante con la iniciativa de inversión.

# Digitalización de la infraestructura en el sector de la energía eléctrica

## Experiencias internacionales en materia de digitalización en el sector de la energía

En este capítulo se analizan experiencias exitosas en materia de digitalización en el sector de la energía en Estados Unidos, Reino Unido, Colombia, Chile y Uruguay. Las iniciativas muestran cómo la digitalización contribuye a hacer un uso más eficiente de los recursos energéticos, proporcionando un mayor conocimiento y control de las actividades en toda la cadena de valor, desde la producción al consumo, al tiempo

que reduce el impacto ambiental del sector energético. Los avances en materia de digitalización han propiciado un mejor aprovechamiento de las fuentes de energía renovable y la integración de las redes, llevando a nuevos modelos de negocio, en los que los consumidores de electricidad son también generadores de energía.

### Implementación de recursos de energía distribuidos en el estado de California (Estados Unidos)

#### ¿Cuál es el problema?

El estado de California, con una población de más de 39 millones de habitantes y una extensión de casi 423.000 km<sup>2</sup>, es el estado más poblado y el tercero más extenso de Estados Unidos (Encyclopedia Britannica, 2020).

En el verano del año 2000, California experimentó una crisis energética derivada de serios problemas de suministro eléctrico. Esta se debió en parte a manipulaciones del mercado, en donde empresas generadoras disminuyeron la oferta de capacidad energética provocando grandes apagones y aumentos en los precios del gas y la energía de hasta el 800 % (DOE, 2016a).

El consumo de energía per cápita de California es el tercero más bajo del país. Sin embargo, en 2016, el costo por kWh era un 22 % más alto que el promedio nacional para todos los sectores (residencial, comercial, industrial y transporte).

Las frecuentes olas de calor y sequías en California en los últimos años han puesto en alerta a las autoridades ambientales y llevado a la implementación de políticas enfocadas a disminuir el impacto ambiental del sector energético y reducir el poder de mercado de las empresas con capacidad de generación.

## ¿Cómo lo resolvieron?

Como respuesta a la crisis energética del año 2000, se reforzaron las medidas regulatorias que dos años antes habían liberalizado el mercado energético, obligando a los consumidores a escoger un comercializador regulado por la Comisión de Servicios Públicos de California (CPUC, por sus siglas en inglés) (DOE, 2016a).

En 2014, a través de la reglamentación R.01-10-024 de la CPUC, se incluyó el uso de energías ambientalmente responsables y la generación distribuida de energía (DOE, 2016a) como parte de las políticas a adoptar para evitar una crisis energética como la de 2000. Esto significaba la adopción de un esquema en el que los usuarios son a la vez consumidores y generadores de energía, como alternativa al sistema tradicional de generación centralizada (Paulos, 2018).

Los denominados recursos de energía distribuidos (*distributed energy resources* o DER) son el conjunto de tecnologías que producen, almacenan, administran y reducen el uso de energía. Su característica común es que son lo suficientemente pequeños como para ubicarse de forma distribuida en la red, cerca del lugar donde se encuentra el usuario (Paulos, 2018). Dentro de las tecnologías más usadas en California para la generación de energía distribuida están las turbinas de viento, las pilas de combustible, las microturbinas, los motores de combustión interna y los paneles solares (CPUC, 2013), siendo estos últimos los de mayor expansión en ese estado (Paulos, 2018).

Existen dispositivos y tecnologías que facilitan la operación, comunicación y control de los elementos de la red distribuida. Entre ellos se encuentran:

- El medidor inteligente, que cuantifica cada hora el consumo de energía del usuario y lo transmite en tiempo real a las compañías de energía y al cliente. Los medidores inteligentes evitan las visitas periódicas para realizar la lectura del consumo y permiten la facturación por tiempo de uso (Paulos, 2018).
- El inversor inteligente, que, además de convertir la energía por corriente directa en corriente alterna, puede conectarse a la red bajo diferentes niveles de voltaje y frecuencia y ayudar a mantener la calidad y confiabilidad de la potencia, contrarrestando las desviaciones de voltaje en la red. Adicionalmente, es posible, de forma remota, tomar datos para monitorear y ajustar la operación de los inversores.
- Sistemas de comunicación y control. Los sistemas de gestión de recursos de energía distribuidos (*distributed energy resource management systems* o DERMS) permiten

conectar, monitorear y controlar los dispositivos DER de la red, lo cual facilita su agregación para poder ofrecer capacidad y energía al mercado y así competir con las tradicionales plantas generadoras.

Dentro de las políticas adoptadas en el estado de California para el desarrollo de los DER, cabe destacar los programas de medición de la energía neta (*net energy metering* o NEM, por sus siglas en inglés) y “Rule 21”:

- La NEM consiste en un acuerdo de facturación en el cual el usuario paga por la energía neta consumida, es decir, la cantidad de energía que queda al restar de la energía consumida proveniente de la red aquella producida por los DER y entregada a la red (California Distributed Generation Statistics, 2020a). En el sistema de NEM se incluyó un cobro único por interconexión. Este tipo de medición es posible gracias a los medidores inteligentes, que permiten cuantificar en el tiempo la cantidad de energía que pasa a través del medidor en ambos sentidos, es decir, de la red de distribución a los recintos del usuario y viceversa.
- La “Rule 21” del estado de California describe los requerimientos de interconexión, operación y medición de los DER que se conecten con el sistema de distribución. En diciembre de 2018, a través de la decisión D.14-12-035, se actualizaron las especificaciones técnicas de los inversores y se requirió a los proveedores de energía la instalación de inversores inteligentes (CPUC, 2020).

## ¿Qué impacto han tenido las innovaciones realizadas?

El estado de California es considerado como un referente mundial, tanto en el diseño de políticas para incentivar las tecnologías DER como en su implementación. Dentro de los principales logros se encuentran los siguientes:

- En junio de 2018, existían 800.000 usuarios con paneles solares generando una capacidad de 6.500 MW. En ese mismo año, la Comisión de Energía impuso, dentro del código de construcción, el requerimiento de que se instalasen paneles solares en todos los hogares construidos a partir de esa fecha, con lo cual se proyecta una instalación anual de 75.000 paneles solares adicionales (Paulos, 2018). A mayo de 2020, la capacidad generada por los paneles solares ascendía a 8.500 MW (California Distributed Generation Statistics, 2020b).
- En 2014, la penetración de los medidores inteligentes en el sector residencial era del 82 % (DOE, 2016a).

- Según datos del sitio web Estadísticas de Generación Distribuida de California, a mayo de 2020, el 67 % de los paneles solares eran propiedad del usuario (California Distributed Generation Statistics, 2020b).
- En esa misma fecha, la distribución de los sistemas fotovoltaicos por tipo de usuario era la siguiente: 67 % residencial, 23 % comercial, 5 % del sector educativo y el resto del sector industrial, el gobierno, entidades sin ánimo de lucro y militar (California Distributed Generation Statistics, 2020b).
- Desde el año 2000, ha dejado de prevalecer el carbón y la energía nuclear como fuente de generación, pasando a predominar las fuentes de energía renovables (DOE, 2016a), lo que contribuye a la disminución de los niveles de contaminación.

### ¿Cuáles han sido las principales lecciones aprendidas?

La acelerada adopción de los DER en California ha sido posible gracias a un conjunto de políticas ambiciosas y vanguardistas enfocadas en el uso de fuentes de energía renovables y la disminución de emisiones, las cuales han sido implementadas principalmente a través de medidas regulatorias (DOE, 2016a).

Para garantizar que los usuarios adopten los DER, es necesario que estos últimos puedan monetizar los beneficios de la

## Establecimiento de infraestructura de datos y comunicaciones en el Programa de Implementación de Medidores Inteligentes en Reino Unido

### ¿Cuál es el problema?

Reino Unido está conformado por cuatro naciones: Escocia, Gales, Inglaterra e Irlanda del Norte. Cuenta con una población de 63 millones de habitantes y una extensión de 242.514 km<sup>2</sup> (BBC, 2020).

En Reino Unido, se estima que más de la mitad del consumo de energía corresponde al sector residencial y al de transporte. Aproximadamente el 30 % de las emisiones de dióxido de carbono están asociadas a la generación de energía y se tiene como meta que para el año 2050 estas emisiones se reduzcan a casi el 0 % (Sovacool et al., 2017).

Muchos de los medidores de electricidad residenciales datan de finales del siglo XIX y están ubicados en el interior de los hogares (Sovacool et al., 2017). La lectura de los

tecnología. Lo anterior se logra principalmente a través del diseño de tarifas. En el caso de California, la NEM posibilita que los usuarios tengan ahorros recurrentes en el consumo de energía, permitiendo recuperar los costos iniciales de instalación de la solución (Paulos, 2018).

La digitalización de los activos de la infraestructura, como los medidores e inversores, permite su monitoreo y control y facilita una gestión eficiente de la red, mejorando su calidad y confiabilidad.

El uso de los DER en el estado de California ha traído consigo muchos beneficios para los usuarios y proveedores de energía. Sin embargo, son muchos los retos que el continuo despliegue de esta tecnología trae consigo, sobre todo en términos de riesgos operativos asociados a la planeación de la capacidad de la red de transmisión y distribución y a la confiabilidad de la red al interconectarse un elevado número de DER. Por ejemplo, los paneles solares producen una gran cantidad de energía durante el día; sin embargo, al ocultarse el sol, aumenta la demanda de energía sobre la red central en un corto período de tiempo. Este fenómeno se conoce como curva del pato (*duck curve*) (DOE, 2016a).

Por otra parte, es importante considerar el elevado poder dominante y la asimetría de información que las empresas tradicionales de generación, transmisión y distribución de energía pueden utilizar a su favor para desincentivar la adopción de esquemas de energía.

medidores se realiza de forma manual cada 6 o 12 meses (Lewis y Kerr, 2015) y en muchos casos requiere que un miembro del hogar se encuentre presente para permitir el acceso a la persona encargada de registrar el dato de consumo.

El elevado intervalo de tiempo entre las lecturas de los medidores hace que la facturación del servicio se realice por estimaciones que suelen ser inexactas e ineficientes. Estas deficiencias afectan de manera negativa los niveles de satisfacción del cliente y a su vez genera costos adicionales a las empresas comercializadoras de energía para atender las quejas y reclamos de los usuarios. Según Lewis y Kerr (2015) existían únicamente ocho perfiles de usuario en el algoritmo utilizado para estimar el consumo de energía para alrededor de 25 millones de hogares.

## ¿Cómo lo resolvieron?

En el año 2006, la Unión Europea adoptó la directiva 2006/32/EC (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2006) sobre eficiencia energética de uso final y servicios de energía. En virtud de esta directiva, los Estados miembros deben asegurar que los usuarios cuenten con un medidor y una factura que muestre el consumo real de energía y que se instalen medidores individuales en donde sea técnica y económicamente viable. Posteriormente, a través de la Directiva 2009/72/EC (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2009), se estableció que, cuando se valorara positivamente la implementación de medidores inteligentes, al menos el 80 % de los usuarios deberían contar con dichos aparatos.

En Reino Unido, mediante las leyes de energía de los años 2008 y 2011, se realizaron los ajustes regulatorios requeridos para desarrollar el Programa de Implementación de Medidores Inteligentes (*Smart Metering Implementation Program* o SMIP). Después de las fases de diseño y preparación, en el año 2016 se inició la fase de implementación.

El SMIP está considerado como el proyecto de tecnología más importante liderado por el Gobierno en la historia del Reino Unido y como la iniciativa más compleja, ambiciosa y costosa del mundo en cuanto a medidores inteligentes se refiere (Lewis y Kerr, 2015).

La instalación de medidores inteligentes se considera como un paso importante para desarrollar un sistema de energía inteligente. Estos dispositivos proporcionan al usuario información casi en tiempo real de su consumo de energía, permitiéndole tomar decisiones informadas para reducir su consumo y entender el costo asociado; los comercializadores de energía obtienen de ellos información precisa y actualizada para realizar la facturación del servicio y mejorar la atención al cliente; los operadores de red cuentan con información valiosa para optimizar la gestión de la red; y finalmente, otros actores pueden utilizar los datos de consumo de energía para ofrecer servicios de valor agregado (Department for Business, Energy & Industrial Strategy, 2018).

Las metas del SMIP eran instalar para el año 2020 un total de 23 millones de medidores inteligentes de gas, 27 millones de medidores inteligentes de electricidad e igual número de monitores de visualización en los hogares (*in home display device* o IHD), así como de dispositivos de comunicaciones. La instalación de estos equipos es responsabilidad de los comercializadores de energía (Sovacool et al., 2017).

Se estima que los costos del SMIP ascienden a casi GBP 11.000 millones, con un costo de aproximadamente GBP 215 por medidor instalado, que serían asumidos por los usuarios en su factura. Por otro lado, los beneficios estimados del SMIP ascienden a aproximadamente GBP 17.000 millones, resultando en un beneficio neto estimado de GBP 6.000 millones. Cabe resaltar que los actores más beneficiados son, por este orden, los comercializadores (disminución de reclamos y de visitas para la lectura de consumo), los usuarios (ahorros en el consumo de energía), la población de Reino Unido (disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>), los operadores de la red (reducción de pérdidas y costos de mantenimiento) y los generadores de electricidad (planificación de la oferta según la demanda).

Reino Unido optó por una arquitectura centralizada para la gestión de la información del sistema (Anderson y Fuloria, 2011). En 2013, el Departamento de Energía y Cambio Climático (ahora parte del Departamento de Negocios, Energía y Estrategia Industrial) otorgó a la Data Communications Company (DCC) una licencia de 12 años (prorrogable por 6 años), regulada por la Oficina de los Mercados de Gas y Electricidad (Ofgem, por sus siglas en inglés), para construir la red de comunicaciones y administrar los datos del sistema (DCC, 2020a).

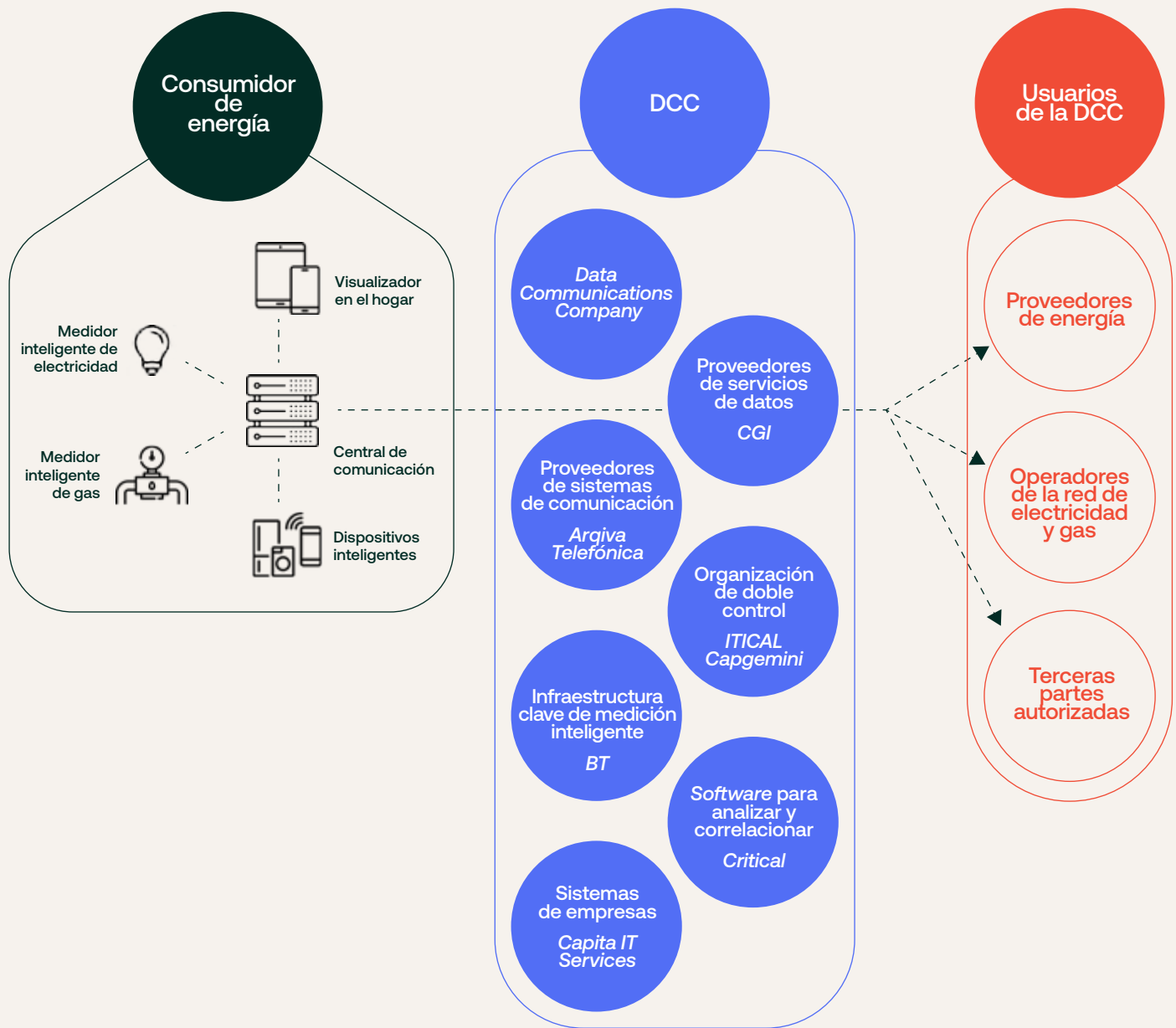
La DCC es la encargada de controlar el flujo de información generado en los medidores inteligentes con los diferentes actores del sistema, atendiendo los lineamientos de la Política de Acceso y Privacidad de la información del SMIP y del Código de Energía Inteligente (*Smart Energy Code* o SEC) (Secretaría del Estado, 2013). A su vez, es la encargada de facilitar el cambio de comercializador de energía, promoviendo la competencia. En la Figura 3.1 se observa el ecosistema de la DCC.

## Gobernanza de datos

La política de acceso y privacidad de los datos del SMIP tiene como objetivo salvaguardar la información de los usuarios y proteger su privacidad. Con ella se da al usuario la potestad de decidir quiénes pueden acceder a sus datos de consumo, con qué periodicidad y propósito, salvo que dicha información sea requerida para algún proceso previamente autorizado y regulado (Department for Business, Energy & Industrial Strategy, 2018).



Figura 3.1 — Ecosistema de la DCC



Fuente: DCC (2019).

### Cuadro 3.1 — Política de acceso y privacidad de la información en el SMIP

Usuarios	Comercializadores
<p>El usuario puede acceder a sus datos de consumo a través del monitor de visualización (IHD) instalado en cada vivienda o de los dispositivos de acceso al consumo (<i>consumer access devices</i>) que se conectan a los medidores y a otros componentes inteligentes de la red inalámbrica residencial (<i>home area network</i> o HAN).</p> <p>Adicionalmente, el usuario puede solicitar a su comercializador de energía información sobre el consumo histórico de hasta 24 meses.</p>	<p>Los comercializadores tienen acceso mensual o diario al consumo para realizar procesos autorizados. Por ejemplo, acceso mensual para realizar el proceso de facturación, acceso diario en caso de sospecha de robo de energía, para realizar pruebas autorizadas o para responder a alguna solicitud del usuario.</p> <p>Los comercializadores pueden acceder a datos de consumo con una periodicidad diaria o cada media hora, para lo cual deben comunicar al usuario para qué van a usar la información y contar con su consentimiento, ya sea por procesos de exclusión o inclusión. Para actividades de mercadeo, se requiere el consentimiento explícito del usuario.</p>
Operadores de la red	Terceros autorizados
<p>Los operadores tienen la obligación de gestionar y operar la red garantizando la continuidad de la oferta de energía y respondiendo a los cambios en la demanda. Con el fin de analizar la demanda, tienen acceso mensual a datos agregados de consumo.</p> <p>También pueden tener acceso a datos de consumo con una periodicidad más granular si cuentan con el consentimiento de los usuarios o para procesos regulados, en caso de existir sospecha de fraude, o para realizar pruebas.</p>	<p>Se refiere a empresas que ofrecen servicios de valor agregado a partir de los datos de consumo de los usuarios, cuyo acceso debe ser autorizado explícitamente por estos últimos.</p>

Fuente: Elaborado a partir de Department for Business, Energy and Industrial Strategy (2018).

#### ¿Qué impacto han tenido las innovaciones realizadas?

- En marzo de 2020, se contaba con un total aproximado de 21 millones de medidores inteligentes instalados, de los cuales alrededor de 17 millones se encontraban operando en modo inteligente (Department for Business, Energy & Industrial Strategy, 2020).
- En diciembre de 2019, la cobertura de la red de telecomunicaciones alcanzaba un nivel del 99,25 % en el norte del país y del 97,75 % en el centro y sur. Se espera que para 2021 se alcance la meta de cobertura del 99,5 % y 99,25 % respectivamente (DCC, 2019).
- En junio de 2020, se enviaron más de 161 millones de mensajes en la red (DCC, 2020b).
- La cobertura de la infraestructura de telecomunicaciones en Reino Unido en 2020 era superior al 99 %, con una plataforma de gestión de datos que cumple con estándares de seguridad y con políticas de tratamiento de datos, que se constituye como la base para el desarrollo de la red inteligente de energía del país. Esta infraestructura de telecomunicaciones y datos podría ser utilizada para el desarrollo de otras aplicaciones en sectores como el transporte o la salud.

#### ¿Cuáles han sido las principales lecciones aprendidas?

- El SMIP, una iniciativa sumamente ambiciosa y compleja, ha experimentado varias dificultades que han limitado el cumplimiento de las metas de instalación de los medidores inteligentes al 43 %. Por otra parte, los costos han sido superiores a los inicialmente proyectados. De la experiencia del Reino Unido cabe resaltar lo siguiente:
- Se estima que se generaron sobrecostos relacionados con la instalación de los medidores de aproximadamente GDP 1.000 millones, debido a que en aproximadamente el 10 % de los casos fue necesario realizar varias visitas para poner en funcionamiento la solución o porque en el momento de la visita no había una persona que permitiera el acceso a la vivienda (Sovacool et al., 2017).
  - La solución de comunicaciones inalámbrica de área local, que utiliza el estándar Zigbee, experimenta problemas de propagación de la señal en viviendas con muros anchos y en apartamentos de edificios altos, donde los medidores se ubican en el primer piso, generando problemas de comunicación entre los medidores y el monitor IHD (Sovacool et al., 2017).
  - Sovacool et al. (2017) documentan una baja adopción y uso por parte de los usuarios del monitor IHD, reportando que, luego de un año, aproximadamente el 40 % de los usuarios dejan de consultar la información de su consumo.

Lo anterior pone en riesgo uno de los principales objetivos del programa, que consiste en concientizar a los clientes sobre su consumo de energía y así disminuirlo y contribuir a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

- El costo asociado a los 27 millones de monitores IHD es de aproximadamente GBP 800 millones (Sovacool et al., 2017). Lewis y Kerr (2015) sugieren que el desarrollo de una aplicación para teléfonos inteligentes podría cumplir con la funcionalidad de los monitores IHD.
- Es recomendable revisar quiénes asumen los costos de implementación de una iniciativa de este tipo frente a los beneficios estimados para los diferentes actores. En el caso de Reino Unido, los costos de los medidores y su instalación son asumidos por los usuarios; sin embargo, se estima que son los comercializadores los que obtienen mayores beneficios. Lo

anterior toma más peso si se considera que, según Sovacool et al. (2017), el ahorro de energía real es de entre el 1 % y el 3 %, y no del 5 % al 15 % inicialmente proyectado.

- Resulta importante la oferta de valor agregado que las empresas puedan generar con el análisis del gran volumen de datos proporcionados por los medidores inteligentes. Por ejemplo, se podrían desarrollar aplicaciones que de forma automática gestionen electrodomésticos, como lavadoras o lavavajillas, para que entren en funcionamiento en horarios donde la energía es menos costosa.
- El aprovechamiento de la infraestructura de telecomunicaciones y de la plataforma de gestión de datos, así como el conocimiento adquirido en el desarrollo de este proyecto, es fundamental para el diseño e implementación de otros sistemas inteligentes en sectores como el transporte, la logística y la salud, entre otros.

## Uso de la inteligencia artificial para la gestión de la energía en edificios comerciales en Reino Unido

### ¿Cuál es el problema?

A nivel mundial, los edificios representan una proporción considerable del gasto energético. De acuerdo con Revesz et al. (2020), en 2015, la calefacción representaba el 50 % del consumo energético a nivel mundial, del cual el 60 % correspondía al sector industrial y el restante 40 % al de edificios.

Según Chou y Bui (2014), el sector de los edificios en Europa genera el 36 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> y consume el 40 % de la energía. En Reino Unido, la calefacción, al igual que el transporte, es responsable de un tercio de las emisiones de CO<sub>2</sub> (Revesz et al., 2020).

Los sistemas de gestión de energía para edificios tradicionales (*building energy management systems* o BEMS) tienen como objetivo crear condiciones ambientales que mejoren el bienestar y confort de las personas, mientras minimizan el consumo de energía requerido para tal propósito, controlando los sistemas de calefacción o refrigeración, ventilación e iluminación del inmueble. Este proceso es complejo debido a la variedad y cantidad de sensores de los cuales se extrae información y los mecanismos de activación y desactivación para controlar los niveles deseados de los diferentes sistemas mencionados. Adicionalmente, el gran volumen de datos por analizar hace que las soluciones sean computacionalmente demandantes (Dounis, 2010).

Existen diferentes avances tecnológicos en el sector eléctrico que se han venido integrando a los edificios. Entre ellos se

encuentran los DER, los medidores e inversores inteligentes y los sistemas de carga de vehículos eléctricos (VE), que ofrecen numerosas ventajas, pero a su vez suponen grandes retos. Por ejemplo, la creciente adopción de paneles solares (que forman parte de los DER) en edificios comerciales, como fuente adicional de energía, supone retos para su operación e integración a la red eléctrica. Estos dispositivos, al igual que los medidores e inversores inteligentes que facilitan la integración de los DER a la red de distribución, producen una gran cantidad de datos que se deben incorporar al BEMS para lograr una gestión energética eficiente del edificio.

Finalmente, la generación de energía distribuida posibilita que los edificios participen en el mercado energético, no solo como consumidores, sino también como productores de energía (AIE, 2019).

La predicción del consumo energético resulta fundamental para optimizar la gestión de energía de un edificio y reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> (Dounis, 2010). La alta complejidad del BEMS y el creciente volumen de datos generados hacen que, actualmente, el uso de la inteligencia artificial se constituya como una alternativa interesante para este propósito.

### ¿Cómo lo resolvieron?

Una empresa emergente británica, Grid Edge, surgida en la Universidad de Aston, desarrolló Flex2X, una solución basada en algoritmos de inteligencia artificial para predecir y optimizar el consumo energético de un edificio (Grid Edge, 2020a).

Flex2X se integra al BEMS del edificio, combinando los datos generados por dicho sistema con datos del clima y del flujo de personas, y con la información obtenida del medidor inteligente y del mercado energético, entre otros (AIE, 2019) (ver la Figura 3.2). El tratamiento de datos a través de modelos de aprendizaje automático (*machine learning*) genera análisis descriptivos y predicciones dinámicas con 24 horas de anticipación, tanto del consumo y el costo de la energía como de los niveles de confort de las personas en el edificio.

Grid Edge realizó un piloto de seis semanas en el centro comercial Bullring de la ciudad de Birmingham. El modelo de inteligencia artificial se construyó a partir de datos históricos de dos años, obteniendo predicciones, con un día de anticipación, de los niveles de ocupación, la temperatura de los espacios interiores y de la carga del sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado (*heating, ventilation and air conditioning* o HVAC). Con estas predicciones, se desarrollaron herramientas analíticas y de optimización de la gestión de la energía, las cuales facilitan al administrador del edificio la toma de decisiones sobre la operación de los activos energéticos, prediciendo el impacto en los niveles de confort, el consumo energético y el costo (Ellison, 2019).

El *software* también se conecta a la red eléctrica a través del medidor inteligente, lo cual permite monitorear en tiempo real el precio de la energía. Esto ayuda a minimizar los costos energéticos del edificio al incrementar o disminuir su carga eléctrica de forma dinámica según los precios de mercado (AIE, 2019).

### ¿Qué impacto han tenido las innovaciones realizadas?

Un sistema de gestión de energía de edificios, con capacidades predictivas y de optimización gracias al uso de la inteligencia artificial, genera beneficios a diferentes actores (AIE, 2019) entre los que se encuentran los siguientes:

- Para los ocupantes de los edificios, se crean condiciones óptimas de confort para disfrutar de las instalaciones. Por otra parte, algunos usuarios podrían preferir edificios inteligentes y ambientalmente responsables.
- Para los edificios, se reducen los costos asociados al consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub>, se brindan mejores condiciones a los usuarios y, finalmente, se abre la posibilidad de generar ingresos por la venta de energía adicional producida con los DER.
- Para la red eléctrica, la predicción de la demanda permite una mejor planeación de la oferta energética. A su vez, se suaviza la curva de demanda, reduciendo la presión en la red, especialmente en los picos.

Se estima que la reducción de costos y la generación de ingresos alcanza hasta un 10 % de los costos anuales de la energía y que la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> es de hasta el 40 % (AIE, 2019).

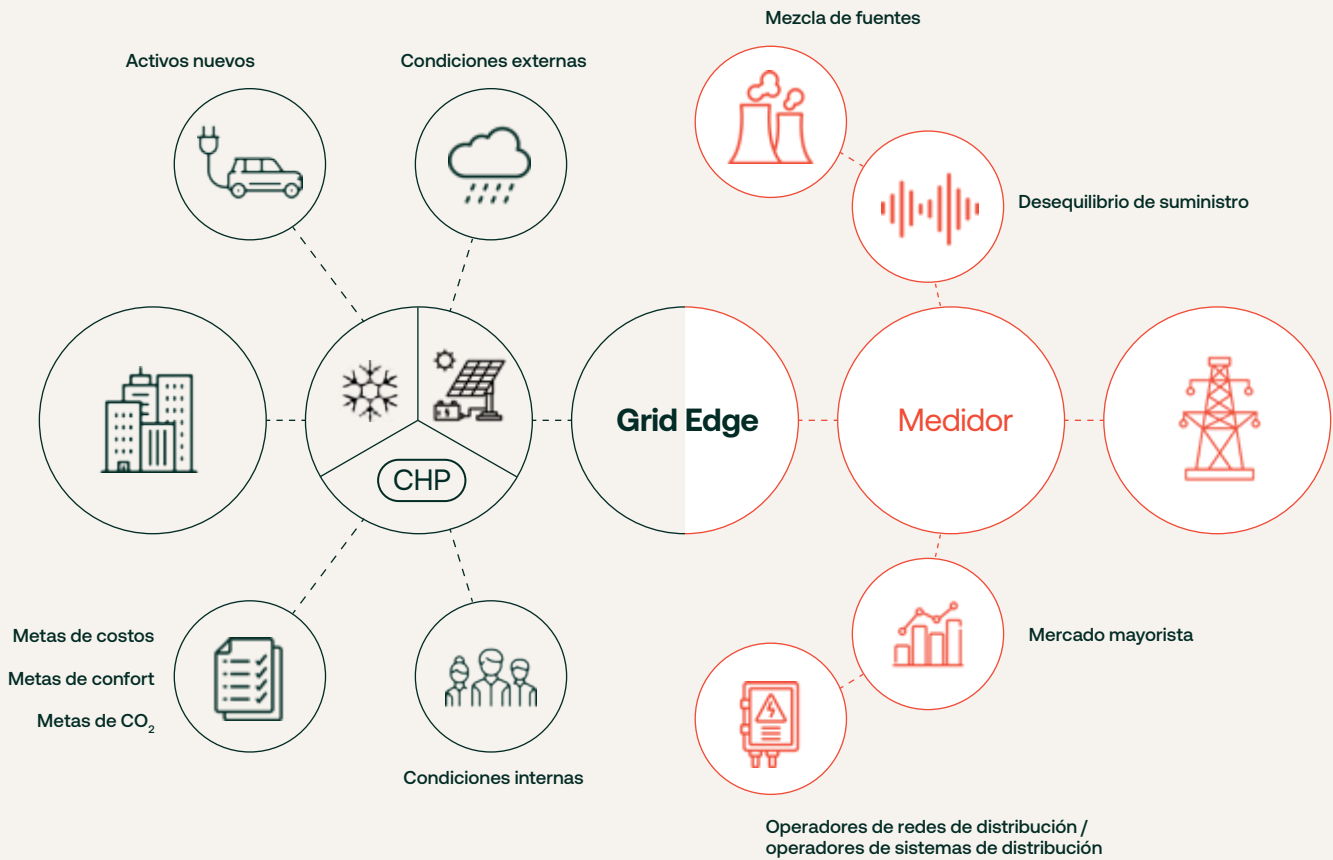
Dentro de los resultados del piloto en el centro comercial Bullring, cabe destacar que se logró gestionar y optimizar la carga del HVAC, respondiendo en tiempo real a las fluctuaciones del precio de mercado. Este resultó en una reducción de costos de GBP 23.000 en las seis semanas de duración del piloto (Ellison, 2019).

Grid Edge está adelantando proyectos para implementar su solución de IA en la estación central de trenes y en el aeropuerto internacional de Birmingham. También ha establecido una alianza con Berkeley Housing Group, empresa dedicada a la construcción de soluciones habitacionales en Londres, Birmingham y en el sur de Inglaterra.

### ¿Cuáles han sido las principales lecciones aprendidas?

- Con los adelantos en IA de Grid Edge, ya no se trata únicamente de gestionar cuánta energía se consume, sino cuándo se consume (Grid Edge, 2020b).
- La solución de IA desarrollada por esa empresa se constituye como una de las muchas soluciones que se podrían ofrecer gracias al uso y análisis del gran volumen de datos generados a partir de la digitalización de los activos de la red eléctrica. Sin embargo, según la AIE (2019), una de las barreras para la adopción de este tipo de soluciones es la dificultad para despertar el interés de los administradores de los edificios. En este sentido, es fundamental que el gobierno cree incentivos regulatorios o formar alianzas con la empresa privada para acelerar su adopción a gran escala.
- Para promover una mayor participación en el mercado energético de los edificios comerciales como proveedores de energía es necesario revisar tanto la regulación, de manera que permita vender capacidad energética a baja escala, como las tarifas de acceso para participar como proveedor en el mercado (AIE, 2019).
- Dentro de los riesgos del uso de la inteligencia artificial, y en general de la automatización de la gestión de la energía, se encuentra una mayor susceptibilidad a ataques cibernéticos. Por tanto, es necesario que se mejore la seguridad de la red. Adicionalmente, también se deben proteger los datos de los usuarios implementando políticas de tratamiento de los datos personales.

Figura 3.2 — Papel de Grid Edge en el sistema de energía



Fuente: Adaptado de AIE (2019).



## Iniciativas sectoriales de redes inteligentes en Colombia

### ¿Cuál es el problema?

La incorporación de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) dentro del sector eléctrico ha optimizado los procesos de operación de las redes de energía eléctrica. Además, ha abierto nuevas oportunidades y modelos de negocio, los cuales están transformando el sector (WEF, 2016a), creando nuevos retos y desafíos a las empresas que prestan estos servicios públicos.

Colombia, a fin de enfrentar el reto que supone la transformación del sector con la incorporación de las TIC en los procesos de operación y mantenimiento, está adelantando un ambicioso proyecto dirigido a acelerar el despliegue y la implementación de redes eléctricas inteligentes en el país. Esta estrategia contribuiría además a la solución de otras problemáticas asociadas con la dependencia que tiene el parque de generación de ciertos fenómenos climáticos (como el de El Niño) y la continuidad de la prestación de los servicios a los usuarios de energía eléctrica.

En efecto, el sector eléctrico colombiano históricamente se ha caracterizado por tener un parque generador altamente dependiente de las centrales hidroeléctricas. De acuerdo con el informe “Variables de generación y del mercado eléctrico colombiano” (UPME, 2018), la capacidad de generación hidráulica en el año 2018 representaba el 69,18 % de la capacidad de generación neta total. Como resultado de esta dependencia, diversos estudios realizados por las autoridades que norman y regulan el sector han identificado una alta vulnerabilidad del sistema eléctrico frente a fenómenos naturales climáticos (UPME, 2015), hecho que se ve reflejado en las preocupaciones sobre posibles racionamientos que periódicamente surgen durante periodos de sequía (MinMinas, 2020; CREG, 2015).

Por otra parte, de acuerdo con reportes de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, existen brechas regionales con respecto a la calidad del servicio ofrecida a los usuarios. En particular, un análisis en 2016 del índice de duración promedio de las interrupciones del sistema (*system average interruption duration index* o SAIDI) mostró que los departamentos ubicados en la costa atlántica —Chocó, Cundinamarca, Tolima, Nariño y Caquetá— en promedio presentaban interrupciones del servicio superiores a 50 horas al año, mientras que en otros, como Antioquia, Caldas, Risaralda, Quindío, Valle del Cauca, Boyacá, Meta y la Ciudad de Bogotá, el promedio era inferior a 20 horas al año. En 2018, este indicador se situó en 37,7 horas al año, similar al valor obtenido en 2016, persistiendo la brecha identificada por regiones.

### ¿Cómo lo resolvieron?

Con el fin de propiciar esta transformación en el sector eléctrico colombiano, en el año 2010, por iniciativa de las empresas del sector eléctrico y de entidades que coordinan la operación de las redes eléctricas y los centros de investigación, se creó “Colombia Inteligente”. El objetivo de esta iniciativa es coordinar la búsqueda de soluciones tecnológicas aplicables en toda la cadena de valor para la prestación de los servicios de energía eléctrica, que comprende desde la generación hasta el consumo final. Para ello, procuran un mejor desempeño que redunde en una mayor calidad del servicio a los usuarios, promoviendo la investigación y puesta en marcha de proyectos con el fin de fomentar soluciones tecnológicas integrales, compartir conocimientos y experiencias que fortalezcan el desarrollo tecnológico de las empresas y entidades del sector eléctrico, acelerar la creación de valor mediante procesos de coparticipación sectorial y viabilizar la implementación de redes inteligentes en el país (Colombia Inteligente, 2016).

Posteriormente, como parte de estas iniciativas, el Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, con el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), realizaron el estudio “Smart Grids Colombia Visión 2030” (MinMinas, UPME y BID, 2016). En él se definieron una serie de acciones y vías para la implementación de cuatro tecnologías de redes inteligentes: i) infraestructura de medida avanzada; ii) automatización de la red de distribución; iii) recursos energéticos distribuidos; y iv) movilidad eléctrica (VE). Como parte de sus resultados, el estudio propuso la implementación de las redes inteligentes en Colombia en tres fases, cuyas metas se presentan en la Figura 3.3

Como resultado de este estudio, Colombia Inteligente (2019) ha desarrollado una serie de documentos sobre el avance de la incorporación de las TIC a las redes eléctricas y la experiencia de las iniciativas desarrolladas en el país. También ha formulado recomendaciones para habilitar y acelerar la integración o adaptación de esas tecnologías al sector eléctrico colombiano.

Adicionalmente, teniendo en cuenta que uno de los principales elementos que propician esta transformación en el sector eléctrico es el despliegue e implementación de los AMI, el Ministerio de Minas y Energías expidió en 2018 la Resolución 4 0072 (Ministerio de Minas y Energía, 2018). En ella determinó que, para el año 2030, el 95 % de los usuarios de las cabeceras municipales y el 50 % de las zonas rurales estarían conectados con sistemas de medición avanzada y encomendó a la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) la definición de las condiciones para la implementación de esta

infraestructura. Sin embargo, estas metas fueron modificadas por solicitud de la CREG mediante la Resolución 4 0483 de 2019 (Ministerio de Minas y Energía, 2019), debido a la existencia de diferentes modelos para la realización de las actividades asociadas con el despliegue y puesta en marcha de este tipo de infraestructura, que permiten la participación de agentes externos al sector. En esa nueva resolución se determinó que, para el año 2030, el porcentaje mínimo de usuarios del sistema nacional de interconexión conectados a sistemas de infraestructura de medición avanzada sería del 75 %.

Además de la definición de la distribución de las actividades para la implementación de los AMI como componentes de las redes inteligentes, la CREG está definiendo los ajustes regulatorios que se adoptarán para la recuperación de las inversiones y los costos de funcionamiento. Los ajustes se refieren también a las condiciones de interoperabilidad de estos sistemas y los requisitos de ciberseguridad, manejo, uso, protección y privacidad de los datos e información que serán generados con la implementación de los AMI (Ministerio de Minas y Energía, 2019).

Se esperaba que las autoridades que regulan y norman el SEC definieran en el año 2021 estos aspectos y que se acelerara la implementación de las redes inteligentes en Colombia.

#### ¿Qué impacto han tenido las innovaciones realizadas?

Dentro de los impactos previstos por la implementación de las redes inteligentes en Colombia se identificaron los siguientes (MinMinas, UPME y BID, 2016):

- Una reducción del 25 % de las pérdidas técnicas y del 8 % de las no técnicas.

## Modernización del sector eléctrico en Chile

#### ¿Cuál es el problema?

Chile es un país que posee un área total de 756.102 km<sup>2</sup> con una población estimada de 18 millones de habitantes en 2020. El 90 % de la población vive en el tercio medio del país, alrededor de la capital, Santiago, mientras que hay bajas densidades demográficas en las regiones del norte y sur del país (CIA, 2020).

Con el fin de modernizar el sector eléctrico, la Presidencia de la República presentó en 2014 la Agenda de Energía, donde se planteaba una hoja de ruta para el diseño y la ejecución de políticas energéticas con una visión a largo plazo. Esta política se soportaba en cuatro pilares: i) seguridad y calidad del suministro, ii) energía aplicada al desarrollo, iii) compatibilidad

- Aplanamiento de la curva de la demanda. En Colombia, la relación entre el consumo en horas valle y pico es de 0,53. Se espera que esta relación mejore un 66 % con la implementación de los AMI.
- Reducción de los costos de comercialización al evitar el desplazamiento del personal a los puntos de medición.
- Mejoras en la continuidad del suministro, pasando de un SAIDI de 29,47 horas al año a otro de 10 horas anuales.
- Disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub>, manteniéndolas en los niveles actuales.
- Aumento de la independencia energética frente a fenómenos naturales y mejora del 36,7 % en el factor de potencia al integrar fuentes de generación distribuida.
- Aumento en dos años de la vida útil de los elementos que conforman las redes eléctricas.

#### ¿Cuáles han sido las principales lecciones aprendidas?

La implementación de redes inteligentes en Colombia promete ser una alternativa para solucionar la dependencia que tiene el parque de generación eléctrica de factores climáticos y los problemas de calidad del servicio que afectan a los usuarios. Sin embargo, su despliegue se ha visto afectado por la definición de aspectos regulatorios, en particular sobre la operación y gobernanza de los datos generados por los AMI, la recuperación de los costos del despliegue de redes inteligentes, aspectos relacionados con la interoperabilidad de los sistemas y requisitos de ciberseguridad que estos deben cumplir, demostrando que es una tarea compleja que dificulta una rápida implementación.

con el medio ambiente y iv) eficiencia y educación energética. En ella se concibieron dos horizontes principales: uno a corto plazo, que mantuviera la factibilidad técnica y la sustentabilidad de la matriz energética, y otro a mediano y largo plazo, que pudiera proyectar un modelo descentralizado y participativo hacia el año 2050 (Ministerio de Energía, 2015).

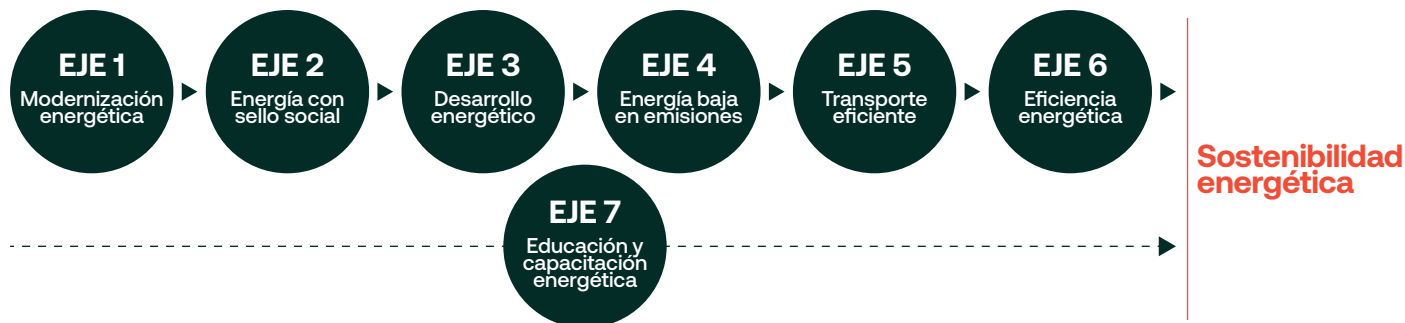
Posteriormente, durante el mandato del presidente Sebastián Piñera, se presentó la “Ruta Energética 2018-2022”, que forma parte de la agenda de energía a corto plazo, y la “Hoja de Ruta 2050: Hacia una energía sustentable e inclusiva para Chile”, que pretende establecer los elementos cruciales a ser considerados por la política energética del país a largo plazo. En esta se propone lograr la transformación del sector



eléctrico, aprovechando las nuevas oportunidades y soluciones ligadas a la innovación y el desarrollo tecnológico, como son las nuevas fuentes de generación eléctrica, la generación

distribuida, las alternativas de almacenamiento, los vehículos eléctricos y la gestión de la demanda energética, entre otras (Ministerio de Energía, 2018).

Figura 3.4 — Ruta energética 2018–2022



Fuente: Tomado de Ministerio de Energía (2018).

### ¿Cómo lo resolvieron?

Con el fin de modernizar el sector eléctrico, en primer lugar, el Gobierno chileno se dio a la tarea de definir un marco normativo que permitiera su implementación.

En el año 2017, la Comisión Nacional de Energía (CNE) publicó en el diario oficial la Resolución de Exención número 706, mediante la cual se estableció un estándar técnico de calidad del servicio. Entre otros aspectos, se indicaba que las empresas distribuidoras tenían la obligación de implementar sistemas de medición, monitoreo y control (SMMC) que midieran el consumo, monitorearan el estado del suministro y controlaran la operación remota. Esta resolución incluía un anexo técnico, el cual sería publicado en una fecha posterior a su expedición, donde se definirían especificaciones detalladas de los medidores inteligentes y algunos indicadores para medir el desempeño del sistema. La resolución también estableció que la implementación del SMMC se debería finalizar en un plazo de siete años, a contar a partir de la expedición del nuevo decreto tarifario, además de indicar una meta intermedia, por la que el 15 % de los medidores deberían estar instalados en los dos años siguientes a la emisión del mencionado decreto (Verdejo y Becker, 2020).

En febrero de 2018 el Gobierno chileno promulgó la Ley 21.076, donde estipuló que los medidores son parte de la red de distribución y, por lo tanto, son propiedad y responsabilidad del concesionario del servicio público de distribución. Así mismo

indicó que los usuarios que fueran dueños de medidores antes de la expedición de esta ley mantendrán dicha propiedad hasta que se realice el cambio de este elemento de la red eléctrica.

En septiembre del mismo año, se emitió un decreto tarifario ordenando que los costos de instalación y operación del SMMC se incluyeran como parte de los costos generales del sistema de distribución, en concordancia con la Ley 21.076. Bajo este decreto, los costos de reemplazo de los nuevos medidores estarían incluidos dentro de la tarifa.

El Anexo Técnico de la Resolución de Exención n.º 706 finalmente fue publicado en agosto de 2019. Sin embargo, para las autoridades de esa época, la ausencia de este anexo no fue obstáculo ni excusa legal o técnica para iniciar el proceso de instalación de los medidores inteligentes.

Esta situación derivó en un escenario en el que las empresas del sector eléctrico instalaron medidores inteligentes, bajo estándares diferentes a los definidos en el anexo técnico, lo que desató la llamada “crisis de los contadores inteligentes”. Esta aún se encuentra en camino de ser solucionada por el Gobierno chileno (Verdejo y Becker, 2020).

Además de esas medidas, el Coordinador Eléctrico Nacional adoptó la normativa de protección de infraestructura crítica de la North American Electric Reliability Corporation (NERC)<sup>26</sup>, de obligatorio cumplimiento para las entidades responsables. Para

26. La NERC es una autoridad regulatoria internacional de fines no lucrativos cuya misión es asegurar la efectiva y eficiente reducción de riesgos ligados a la fiabilidad y seguridad de la red.

cada tipo de cbersistema del sistema eléctrico nacional, se establecen requerimientos, medidas de control, aplicabilidad, excepciones y parámetros de confidencialidad (Coordinador Eléctrico Nacional, 2020).

### ¿Qué impacto han tenido las innovaciones realizadas?

Se espera que el cambio de los contadores analógicos por aparatos inteligentes permita a los operadores de la red hacer frente a tres importantes retos: mejorar la calidad del servicio y los estándares de seguridad; ofrecer diferentes tarifas horarias de acuerdo con el perfil de consumo de los usuarios finales y potenciar el uso de las energías renovables no convencionales a nivel residencial.

## Iniciativas sectoriales de redes inteligentes en Uruguay

### ¿Cuál es el problema?

Uruguay es un país pequeño para la escala de América del Sur, con 176.000 km<sup>2</sup> y una población de aproximadamente 3,4 millones de habitantes en 2020. Cerca del 57 % de la población vive concentrada en torno al área metropolitana de Montevideo (CIA, 2020).

La matriz de generación energética de Uruguay cuenta con una infraestructura de producción total de 4.920 MW. Esta producción se encuentra distribuida en proporciones similares entre centrales hidroeléctricas (1.538 MW), centrales térmicas que funcionan a partir de combustibles fósiles y residuos de biomasa (1.615 MW) y centrales eólicas (1.514 MW). Finalmente, las centrales solares suministran un remanente de 254 MW, con lo cual el factor de penetración de las fuentes eólica y solar representan el 36 % de la capacidad instalada (Ministerio de Industria, Energía y Minería, 2020).

En el sistema eléctrico uruguayo la frecuencia es de 50 Hz, teniendo una interconexión física con Argentina que permite un intercambio de energía máximo de 2.000 MW. Existe también una interconexión con Brasil de 70 MW, cuya capacidad se está ampliando a 500 MW (Aguirre et al., 2015).

El problema planteado era lograr una mayor eficiencia energética. Para ello, el Plan Nacional de Eficiencia Energética de Uruguay prevé una reducción del 5 % del consumo esperado en el año 2024 (Ministerio de Industria, Energía y Minería, 2015).

### ¿Cuáles han sido las principales lecciones aprendidas?

La “crisis de los contadores inteligentes” hace evidente la necesidad de contar con un marco normativo que articule el despliegue e implementación de esta tecnología. Solo de esta manera los diferentes actores e interesados que participan en las etapas de la cadena de valor del sector eléctrico tendrán claridad sobre las condiciones que se deben cumplir, evitando posibles repeticiones de procesos que incrementarían los costos, tanto para las empresas como para los usuarios del servicio de energía eléctrica.

### ¿Cómo lo resolvieron?

Con estos objetivos de eficiencia energética, el principal objetivo del Plan de Energía de Uruguay ha sido implementar una red inteligente de consumo y aumentar el parque de fuentes alternativas de energía. Para lograrlo ha adoptado una estrategia de consumo basada en un sistema de demanda-respuesta (Ministerio de Industria, Energía y Minería, 2015).

Como parte de la implementación de esta estrategia, en junio de 2020 el director del proyecto “Redes Inteligentes”, de la Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE)<sup>27</sup>, informó de que se habían instalado 252.000 medidores inteligentes (Energía Estratégica, 2020). La UTE espera instalar 1,5 millones de medidores inteligentes en los próximos cuatro años (UTE, 2020a). Además, se prevé el desarrollo de una plataforma de cadena de bloques para apoyar la ruta de redes inteligentes con el fin de poder dar soporte a la certificación de origen de la energía renovable. La cadena de bloques podría permitir a la UTE intercambios regionales de su excedente energético y transacciones de los certificados emitidos de forma expedita, segura e inmutable (Cointelegraph, 2020).

Los medidores inteligentes cuentan con un sistema de comunicación remoto con los servidores de UTE a través de la red inalámbrica (GPRS, 3G, 4G) de la empresa ANTEL (UTE, 2019). Esos dispositivos permiten hacer un registro cada 15 minutos del consumo energético, de forma que pueden establecerse modalidades de consumo por horas. Además, tanto el usuario como la UTE pueden monitorear

27 UTE es una empresa propiedad del Estado uruguayo, dedicada a las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización de la energía eléctrica, la prestación de servicios anexos y consultoría.

picos y cortes de suministro eléctrico, para así balancear mejor la distribución de cargas y atender contingencias más eficazmente (UTE, 2020a).

Este plan de instalación de medidores inteligentes permitirá a los usuarios acceder a tarifas variables por horas durante los 365 días del año mediante el uso de tecnología de gestión de la demanda de energía. De esta manera, los usuarios podrán optimizar sus consumos, reduciendo los costos para los operadores de la red. De hecho, la UTE reservó un tercio de la capacidad del nuevo centro de datos de ANTEL para almacenar la información recopilada por los medidores inteligentes. Así mismo, se está trabajando en el desarrollo de un dispositivo inteligente, para que el cliente consulte los costos de la energía que está consumiendo por hora (CIER, 2020).

En complemento a esta estrategia, se han establecido planes para impulsar la generación de energía mediante fuentes eólicas (Programa de Energía Eólica en Uruguay) y paneles fotovoltaicos (Plan Solar, decreto 50/012). Esos planes proyectan la incorporación paulatina de medidores inteligentes entre los años 2020 y 2030, los cuales permitirán medir remotamente la demanda y establecer una generación bidireccional de energía con los usuarios, aspecto reglamentado por el decreto 173 del año 2010 (Oficina de Planeamiento y Presupuesto, 2019).

Adicionalmente, con el fin de enseñar a los niños y sus familias cómo funciona el sistema demanda-respuesta, se desarrolló una herramienta didáctica, llamada “Aty arandu”. Este programa complementa el *software* TurtleBots de programación para niños, utilizado en el programa nacional “Una computadora por cada niño”, y los introduce al concepto de red inteligente, adaptado a la tecnología disponible en Uruguay. Esta herramienta brinda a los estudiantes la oportunidad de elegir cuándo consumir energía, sugiriendo que lo hagan cuando la fuente renovable tiene la capacidad de generar electricidad (Aguirre et al., 2015).

Por último, es importante notar que en 2017 la Administración Nacional de UTE inauguró el primer sistema de alimentación de vehículos eléctricos (SAVE) en Uruguay. Para 2020 están previstos 38 puntos de recarga, aunque el proyecto pretende en una segunda fase completar 60 puntos de carga en todo el país y habilitar el SAVE de recarga superrápida a corriente continua en la tercera fase (UTE, 2020b).

### ¿Qué impacto han tenido las innovaciones realizadas?

La instalación de medidores inteligentes ha mejorado aspectos como la facturación, debido a que, en el modelo de lectura

manual, es necesario estimar el 10 % de los consumos del mes, mientras que con la implementación de las nuevas tecnologías esa estimación bajó al 1 %. La medición inteligente permite además atacar otros eventos en la operación de la red de distribución, como el procesamiento de pérdidas y recuperaciones de energía o las consultas de tensión y carga del suministro, permitiendo una reducción significativa de las visitas de campo y habilitando una mayor cantidad de horas disponibles para el mantenimiento preventivo (Energía Estratégica, 2020).

Como resultado de los llamados “planes inteligentes”, se han implementado tarifas horarias distintas para los usuarios residenciales, para lo cual el día se divide en dos o tres franjas. Los valores de consumo de energía entre franjas horarias oscilan entre los 1,994 UYU/kWh para hora valle y los 9,524 UYU/kWh para hora pico (UTE, 2020c).

Con la implementación del sistema de demanda-respuesta, se ha logrado incrementar la penetración de recursos renovables. Entre los años 2014 y 2019, la capacidad de generación a través de fuentes eólicas pasó de 500 MW a 1.500 MW y la solar supera los 250 MW, representando el 34 % del parque de generación uruguayo (Ministerio de Industria, Energía y Minería, 2020).

### ¿Cuáles han sido las principales lecciones aprendidas?

Uruguay tiene una matriz de generación en la que las fuentes renovables son particularmente importantes (36 % de la capacidad) si se compara con otros países de América Latina. Este aspecto pudo ser impulsado por la implementación de tarifas diferenciadas, que incentivan el consumo cuando la fuente renovable tiene la capacidad de generar electricidad.

Por otra parte, el caso de Uruguay muestra la posibilidad de coordinación entre dos empresas estatales para utilizar la red de telecomunicaciones móvil de ANTEL como solución del “último kilómetro”<sup>28</sup> para conectar los medidores de UTE a otros elementos de la red inteligente.

Para la implementación eficaz de un programa de respuesta a la demanda, es necesario que los usuarios comprendan sus patrones de consumo si quieren lograr ahorros en sus facturas. Para ello el Gobierno uruguayo puso en marcha, como se ha indicado, un programa de enseñanza orientado a fomentar un consumo responsable de la energía y tener un mejor entendimiento y comprensión del nuevo sistema nacional (Aguirre et al., 2015).

28. Por esta expresión se conoce el último eslabón de la cadena de suministro, relacionado con la entrega de los productos al consumidor final.

## Caracterización tecnológica de las experiencias analizadas

En el Cuadro 3.2 se categorizan las tecnologías utilizadas en las experiencias analizadas en los apartados anteriores.

Cuadro 3.2 — Categorización de las tecnologías utilizadas en las experiencias analizadas en el sector de la energía eléctrica

<b>País y experiencia</b>	<b>Tecnologías empleadas</b> Tradicionales	Industrias 4.0
<b>Estados Unidos</b> Implementación de recursos de energía distribuidos (DER) en el estado de California	<b>Sistemas de comunicaciones y recursos distribuidos de energía</b>	<b>Big data y análisis de datos</b> <b>Redes inteligentes</b>
<b>Reino Unido</b> Establecimiento de infraestructura de datos y comunicaciones en el Programa de Implementación de Medidores Inteligentes	<b>Redes de telecomunicaciones / computación / interoperabilidad</b>	<b>Big data y análisis de datos</b> <b>Redes inteligentes</b>
<b>Reino Unido</b> Uso de inteligencia artificial en la gestión de energía de edificios comerciales	<b>Sistemas de energía y comunicaciones</b>	<b>Big data y análisis de datos</b> <b>Inteligencia artificial</b>
<b>Colombia</b> Iniciativas sectoriales de redes inteligentes	<b>Sistemas de comunicaciones y recursos distribuidos de energía</b>	<b>Redes inteligentes</b>
<b>Chile</b> Modernización del sector eléctrico	<b>Sistemas de comunicaciones y recursos distribuidos de energía</b>	<b>Redes inteligentes</b>
<b>Uruguay</b> Iniciativas sectoriales de redes inteligentes	<b>Sistemas de comunicaciones y recursos distribuidos de energía</b>	<b>Redes inteligentes</b>

## Matriz de análisis de las experiencias estudiadas

El Cuadro 3.3 resume los principales aspectos de las experiencias estudiadas.

En general, se encuentra que todas las experiencias internacionales estudiadas son aplicables en otros países de América Latina.

Cuadro 3.3 — Matriz con los principales hallazgos de las experiencias estudiadas

Experiencia	Problema	Solución	Impacto	Barreras	Eslabón de la cadena de valor
<b>Estados Unidos</b> Implementación de recursos de energía distribuidos (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"> <li>– Más de 800.000 usuarios con paneles solares</li> <li>– Penetración del 82 % de medidores inteligentes en el sector residencial</li> <li>– Implementación de fuentes de energía renovable, disminuyendo niveles de CO<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Monetización de la energía generada por los DER</li> <li>– Aumento de los riesgos operativos relacionados con la planeación de la capacidad de la red de transmisión y distribución por la incorporación de fuentes de generación eléctrica en las redes de distribución</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Generación</li> <li>– Comercialización de la energía</li> </ul>
<b>Reino Unido</b> 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 necesaria para la implementación de la medición inteligente del consumo de energía	Constitución de la Data Communications Company, con una arquitectura centralizada para la gestión de la información del sistema, que es la encargada de controlar el flujo de la información generada en los medidores inteligentes con los diferentes actores del sistema	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Definición del esquema de gobernanza de datos con el fin de salvaguardar la información de los usuarios y proteger su privacidad</li> <li>– Instalación de aproximadamente 21 millones de medidores inteligentes</li> <li>– En junio de 2020, se cursaron más de 161 millones de mensajes en la red</li> <li>– Definición de franjas horarias tarifarias</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Posibles sobrecostos en la instalación de medidores inteligentes</li> <li>– Dificultades técnicas de comunicación entre los medidores y los monitores instalados en las dependencias de los usuarios por posibles interferencias radioeléctricas</li> <li>– Definición del esquema a través del cual se recuperarán los costos asociados con la implementación de los medidores inteligentes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Distribución</li> <li>– Comercialización de la energía</li> </ul>
<b>Reino Unido</b> Uso de inteligencia artificial en la gestión de energía de edificios comerciales	Disminuir las emisiones de CO <sub>2</sub> y el consumo de energía, creando 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"> <li>– Aprovechamiento y optimización del uso de paneles solares en edificios comerciales</li> <li>– Análisis descriptivos y predicciones dinámicas del consumo y costo de la energía</li> <li>– Posibilidad de generar ingresos por la venta de excedentes de energía producida por los DER</li> <li>– Reducción de la huella de carbono</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Dificultad para despertar el interés en adoptar este tipo de soluciones</li> <li>– Revisión de la regulación, para permitir la venta de energía a baja escala, y de las tarifas de acceso, para participar como proveedor en el mercado</li> <li>– Susceptibilidad a ciberataques, requiriendo mejorar la seguridad informática</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Distribución</li> <li>– Comercialización de la energía</li> </ul>

(continúa)

Experiencia	Problema	Solución	Impacto	Barreras	Eslabón de la cadena de valor
<b>Colombia</b> 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"> <li>- Reducción estimada del 25 % de las pérdidas técnicas y del 8 % de las no técnicas</li> <li>- Mejoras en la continuidad del suministro</li> <li>- Se prevé una disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Definición de aspectos regulatorios, en particular sobre la operación y gobernanza de los datos generados por los AMI</li> <li>- Definición del esquema a través del cual se recuperarán los costos asociados con la implementación de los medidores inteligentes</li> <li>- Interoperabilidad de los sistemas y requisitos de ciberseguridad que deben reforzarse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Generación</li> <li>- Transmisión</li> <li>- Distribución</li> <li>- Comercialización de la energía</li> </ul>
<b>Chile</b> Modernización del sector eléctrico	Diseño e implementación de la estrategia para modernizar el sector eléctrico en Chile	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 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"</li> <li>- Definición del marco normativo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se realizó un amplio despliegue de medidores inteligentes</li> <li>- Adopción de la norma para protección de infraestructura crítica (CIP, por su sigla en inglés) de la North American Electric Reliability Corporation para garantizar la seguridad informática</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Definición de aspectos regulatorios, en particular sobre la operación y gobernanza de los datos generados por los AMI</li> <li>- Definición del esquema a través del cual se recuperarán los costos asociados con la implementación de los medidores inteligentes</li> <li>- Definición de los estándares técnicos que deben cumplir los medidores inteligentes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Distribución</li> <li>- Comercialización de la energía</li> </ul>
<b>Uruguay</b> Iniciativas sectoriales de redes inteligentes	Aumentar la eficiencia energética del país	Implementar una red inteligente y aumentar el parque de fuentes alternativas de energía mediante una estrategia de consumo basado en un sistema de demanda-respuesta	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Instalación de 252.000 medidores inteligentes</li> <li>- Utilización de las redes de comunicación del operador público ANTEL</li> <li>- Definición de planes para impulsar la generación de energía mediante fuentes eólicas</li> <li>- Programas de capacitación para niños y familias utilizado en el programa nacional "Una computadora por cada niño"</li> <li>- Mejoras en la facturación y definición de franjas tarifarias para usuarios residenciales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Para lograr los beneficios esperados, los usuarios deben comprender los patrones de consumo eléctrico y el sistema de respuesta a la demanda</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Generación</li> <li>- Distribución</li> <li>- Comercialización de la energía</li> </ul>

## Identificación de buenas prácticas e impacto de los incentivos regulatorios o fiscales en la promoción y desarrollo de las distintas iniciativas

A continuación, se referencian tres iniciativas internacionales que constituyen ejemplos de buenas prácticas para el desarrollo de la digitalización de la infraestructura en el sector de la energía eléctrica. La primera hace referencia al establecimiento de estándares técnicos en la Unión Europea; la segunda, a programas de estímulos fiscales en los Estados Unidos, y la tercera, a iniciativas regulatorias en el Reino Unido.

### Arquitectura de referencia de las redes eléctricas inteligentes

En 2012 la Unión Europea publicó un documento con la estandarización de una arquitectura de referencia para las redes eléctricas inteligentes (Smart Grid Architecture Model o SGAM) elaborada por el grupo CEN/CENELEC/ETSI. El desarrollo de este modelo se basó principalmente en dos lineamientos (CEN et al., 2012; Gottschalk et al., 2017):

- La definición de los requerimientos de la arquitectura de referencia y la descripción de sus principales elementos, basados en las normas y especificaciones europeas.
- La coherencia con respecto a otros procesos de estandarización adelantados por otros organismos internacionales, como el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de los Estados Unidos (NIST, por sus siglas en inglés), la Red Europea de Gestores de Redes de Transporte de Electricidad y Grupos de Trabajo de Expertos de la Unión Europea, entre otros.

El modelo europeo se elaboró con base en el Modelo Conceptual de Redes Inteligentes formulado por el NIST. Este modelo define siete dominios de alto nivel (generación, transmisión, distribución, clientes, operación, mercados y proveedores de servicios), identificando las comunicaciones y los flujos de electricidad entre cada uno de estos dominios y las interrelaciones que se dan entre ellos. El modelo ayuda a comprender los bloques de una red inteligente y las interrelaciones que se dan entre los segmentos que la conforman.

A diferencia del modelo del NIST, el europeo incorpora un nuevo elemento: los DER. El objetivo de esa integración es adaptarlo a los futuros requerimientos de las redes inteligentes y describir diferentes tipos de operación, desde una red eléctrica centralizada hasta una red eléctrica descentralizada, bajo distintos niveles de penetración de los DER.

Uno de los principales conceptos que se tienen en cuenta para definir el modelo de SGAM es la interoperabilidad, entendida como la capacidad de dos o más dispositivos, independientemente del fabricante, para intercambiar y utilizar la información, garantizando la correcta operación de los sistemas. Ese concepto considera que la implementación de las redes inteligentes corresponde a un proceso de migración, donde las funciones organizacionales y técnicas de un sistema legado (redes eléctricas tradicionales) deben transmitirse a un sistema nuevo (redes inteligentes); por lo tanto, se debe asegurar la interoperabilidad entre estos dos sistemas con el fin de garantizar la continuidad de la prestación del servicio eléctrico a los usuarios.

Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo define ocho categorías de interoperabilidad agrupadas en cinco capas lógicas (véase la Figura 3.5).

- La capa de negocio representa cómo debe ser el intercambio de información desde el punto de vista de dicho negocio. Dentro de esta capa se incluyen aspectos relacionados con las estructuras y políticas económicas y regulatorias, los modelos de negocio y los portafolios de productos y servicios. En esta capa también se representan los procesos para el desarrollo de nuevos modelos de negocio y marcos normativos para su implementación.
- La capa de funciones describe las funciones y servicios del sistema, así como sus relaciones. Estas funciones y servicios se desarrollan a partir de los aspectos considerados dentro de la capa de negocio y son independientes tanto de los actores o elementos que las ejecutan como de la implementación física de las aplicaciones, los sistemas y los componentes.
- La capa de información describe el uso e intercambio de información entre los sistemas y componentes. Incluye los objetos de información y los modelos canónicos de datos que representan la semántica común de las funciones y servicios que permiten la interoperabilidad.
- La capa de comunicación comprende los protocolos y mecanismos para el intercambio de información entre los componentes con respecto a las funciones o servicios y sus correspondientes objetos de información o modelos de datos.

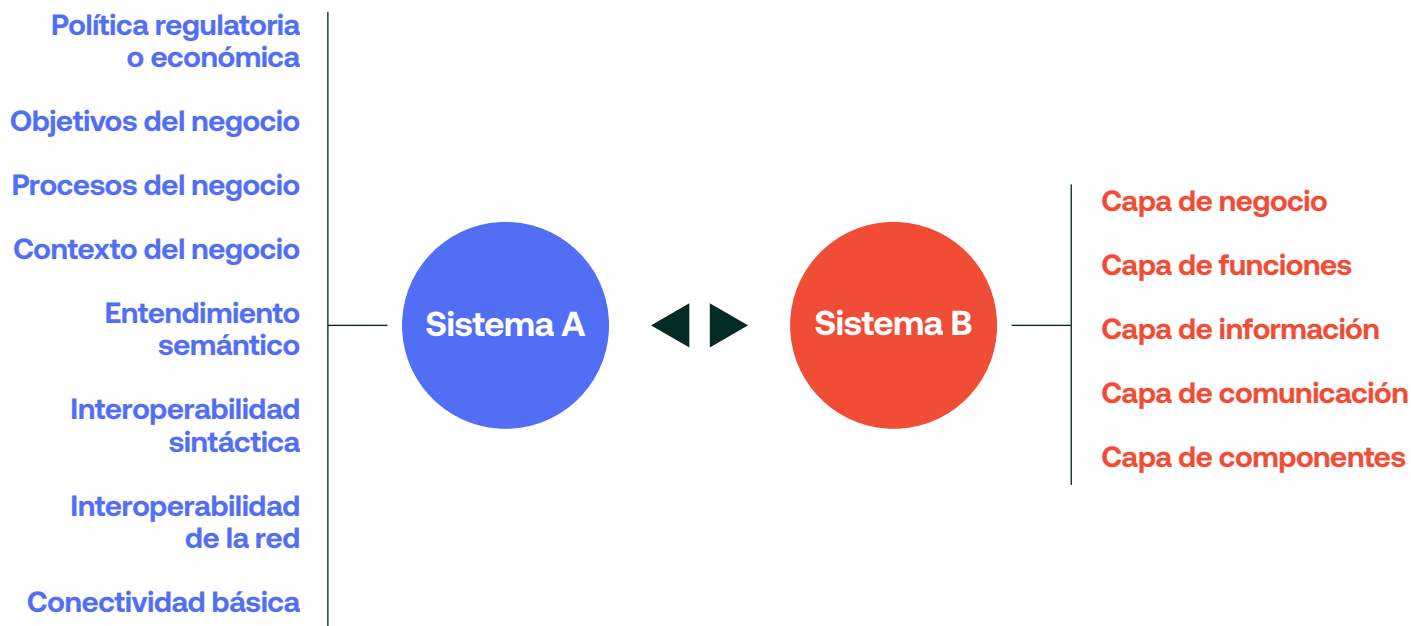
— Por último, la capa de componentes describe la distribución física de todos los elementos que forman parte de una red inteligente. Representa los sistemas, aplicaciones, equipos de generación, protección y telecontrol, la infraestructura de la red y todos los dispositivos inteligentes.

Cada capa del SGAM está conformada por un plano bidimensional, donde uno de sus ejes representa los dominios involucrados dentro de la cadena de conversión de la energía eléctrica (generación, transmisión, distribución, DER e instalaciones del cliente). El otro eje describe las categorías

jerárquicas (zonas) de la gestión de los procesos asociados con la prestación de los servicios de electricidad.

De esta forma, el SGAM es un modelo tridimensional conformado por los ejes de interoperabilidad, dominio y zonas. El modelo permite la representación de las entidades y sus relacionamientos en el contexto de los dominios de las redes inteligentes, las jerarquías para la gestión de la información y las consideraciones sobre interoperabilidad que se deben tener en cuenta.

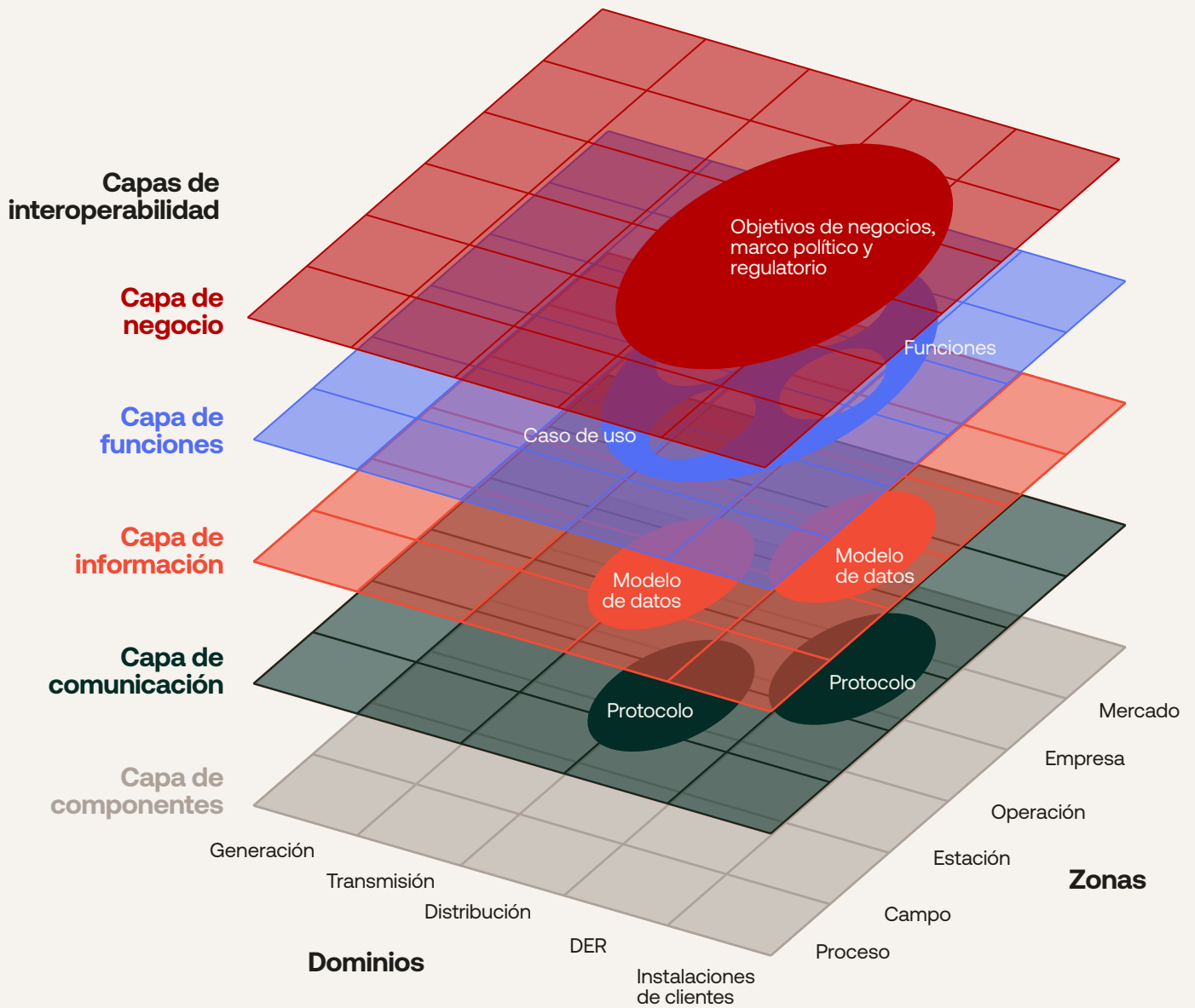
Figura 3.5 — Capas y niveles de interoperabilidad del SGAM



Fuente: Elaborado a partir de CEN, CENELEC y ETSI (2012).



Figura 3.6 — Marco de referencia del SGAM



Fuente: Elaborado a partir de CEN, CENELEC y ETSI (2012)

## Programas de energía de Estados Unidos a partir de la Ley de Recuperación y Reinversión de 2009

La Ley de Recuperación y Reinversión (*Recovery and Reinvestment Act*) de Estados Unidos fue promulgada el 17 de febrero de 2009, durante una de las peores crisis económicas de la historia moderna de este país. Con esta ley se buscaba entregar estímulos fiscales para ayudar a la recuperación de la economía, la cual se encontraba en recesión desde 2007 (Carley, 2016).

El sector energético fue uno de los beneficiarios de este programa, recibiendo aproximadamente USD 90.000 millones. Estos recursos se asignaron a los gobiernos estatales a través del Departamento de Energía (DOE) y se destinaron al financiamiento de proyectos de eficiencia energética, infraestructura de la red eléctrica, energía limpia y tecnologías e infraestructura de transporte alternativas.

Dentro de los programas ejecutados con estos recursos se encontraban el Smart Grid Investment Grant (SGIG) y el Smart Grid Demonstration Program (SGDP) (DOE, 2016b; 2015a).

El SGIG fue financiado no solo con recursos provenientes del DOE, sino también con fondos de la industria del sector eléctrico. En total se invirtieron USD 7.900 millones, con los cuales se ejecutaron 99 proyectos, en los que participaron más de 200 compañías prestadoras del servicio de energía eléctrica y otras organizaciones. El objetivo era modernizar la red eléctrica, fortalecer la ciberseguridad del sistema, mejorar la interoperabilidad y recopilar datos sobre la operación de las redes eléctricas y los beneficios de las redes inteligentes. En particular, a través de este programa se desplegaron más de 1.380 unidades medidoras de fase (*phasor measurement unit* o PMU), 82.000 dispositivos automáticos avanzados de distribución (ADA), 700.000 dispositivos para los clientes (pantallas en las instalaciones del cliente, termostatos de comunicación programables y elementos de control de carga directa) y 16 millones de medidores inteligentes. Entre los resultados obtenidos por el desarrollo de este programa se encuentran:

- Mejoras en la operación de las redes de transmisión, permitiendo la identificación de perturbaciones locales que podrían generar fallas en cadena y, como consecuencia, desembocar en apagones regionales.
- Mejoras en la resiliencia de las redes eléctricas frente a eventos climáticos extremos, reduciendo la magnitud de los apagones y la capacidad de diagnóstico y reparación de los operadores de la red.

- Mejoras en la localización e identificación de fallas, aumentando la capacidad de reparación de las redes de distribución y restauración del servicio, reduciendo los costos operacionales.
- Monitorización más eficiente de los equipos, permitiendo una mejor planeación de los mantenimientos preventivos, lo que redujo los costos de operación y la probabilidad de falla de los equipos, aumentando la calidad de la prestación del servicio.
- Disminución de los picos de demanda máxima, mejorando la forma en que se utilizan los activos y reduciendo las inversiones de los operadores de la red.
- Descenso de los costos de facturación del servicio, al reducir las cuadrillas destinadas a leer las mediciones de consumo de electricidad y disminuir las peticiones, quejas y reclamos de los usuarios.
- Mayor control de los consumos de electricidad por parte de los usuarios, disminuyendo el costo de las facturas y aplanando las curvas de demanda.

Por su parte, el SGDP tenía por objetivo demostrar cómo las nuevas tecnologías, herramientas, técnicas y configuraciones de las redes inteligentes mejoraban la rentabilidad de los sistemas eléctricos. Este proyecto también fue cofinanciado, recibiendo recursos por un valor de USD 600 millones del DOE y USD 900 millones de la industria eléctrica. Los impactos y beneficios de este programa son diversos, teniendo en cuenta que se implementaron varios proyectos en diferentes estados del país. A continuación, se presentan los principales resultados de algunos de los proyectos financiados por este programa (DOE, 2020):

- Sistema de Clasificación Dinámica de Líneas (*dynamic line rating* o DLR,) para la red de transmisión. Este proyecto se desarrolló en el estado de Nueva York y tenía como fin mitigar las restricciones asociadas con la capacidad de las líneas de transmisión para responder a fallas en el sistema.

Como resultado del proyecto se evidenció que la implementación de las tecnologías DLR aumentaba la capacidad de respuesta de las líneas de transmisión y facilitaba la integración de sistemas de generación eólica con las líneas de transmisión.

- Proyecto de Energía Eléctrica Americana, desarrollado en Ohio (DOE, 2015b). A través de este proyecto se instalaron 100.000 medidores inteligentes para usuarios residenciales y 10.000 para usuarios comerciales e industriales. Además, se financió la implementación de dispositivos para la

ADA, tales como elementos de optimización del voltaje y la potencia reactiva (*volt VAR optimization* o VVO) y reconfiguración automática de los circuitos de distribución (*distribution automation circuit reconfiguration* o DACR).

La instalación de infraestructura de medición inteligente, que permitió el establecimiento de programas tarifarios que incentivaban el ahorro en el consumo de energía a ciertas horas del día, y la implementación de dispositivos VVO promovieron un uso más eficiente de la electricidad y la reducción de las facturas de los usuarios. Adicionalmente, la disminución de la demanda del consumo de energía eléctrica evitó la emisión de 2.679 toneladas métricas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera durante la ejecución del proyecto.

Por su parte el despliegue de la tecnología DACR disminuyó el índice promedio de frecuencia de las interrupciones del sistema (*system average interruption frequency index* o SAIFI) en un 25 % y el SAIDI en un 20 %, mejorando la confiabilidad del sistema eléctrico.

De acuerdo con estimaciones realizadas por el DOE sobre el impacto económico de los programas SGIG y SGDP, hasta marzo de 2012 se habían invertido recursos por un valor de USD 2.960 millones, los cuales redituaron beneficios por USD 6.800 millones a la economía estadounidense (DOE, 2013).

### **Código de Energía Inteligente (SEC)**

El SEC es un acuerdo que define los derechos y obligaciones de los proveedores de energía, operadores de la red y otros interesados involucrados en la gestión de la medición inteligente en el Reino Unido (SEC, 2020).

El SEC se desarrolla por medio de la Data Communication Company, autorizada por el Gobierno para gestionar los AMI a través de una licencia. Esta licencia también obliga a los prestadores de los servicios de electricidad y gas y a los operadores de estas redes a participar en el SEC y cumplir con su normativa.

Los principales objetivos del SEC son los siguientes:

- Facilitar la eficiente provisión, instalación, operación e interoperabilidad de la infraestructura de medición inteligente.
- Facilitar la gestión del uso de la electricidad y el gas a los consumidores de estos servicios, permitiendo el acceso a la información recopilada por los sistemas de medición inteligente.

- Promover la competencia entre los actores involucrados en la prestación o en las actividades de comercialización de los servicios de gas y electricidad.
- Garantizar la protección y seguridad de los datos y sistemas asociados con la operación del SEC.
- Facilitar la administración e implementación eficiente y transparente del SEC.

Una de las funcionalidades reguladas por el SEC consiste en permitir a usuarios autorizados (terceras partes), diferentes de los titulares de las cuentas, el acceso a los datos recopilados por los medidores inteligentes, previo cumplimiento de las siguientes salvaguardas (Department for Business, Energy & Industrial Strategy, 2018):

- El titular de la cuenta debe otorgar su consentimiento para compartir la información de consumo a través del DCC.
- Informar a los titulares de las cuentas cómo serán recopilados sus datos de consumo, la forma en que serán utilizados y su derecho a elegir si desean participar.
- Las terceras partes que hagan uso de los datos de consumo deben tomar medidas para verificar que la autorización proviene de la persona que efectivamente habita en la residencia con el fin de evitar las suplantaciones.

El acceso a los datos generados por los AMI ha promovido el desarrollo de nuevos productos y servicios, tales como:

- Tarifas dinámicas y la conexión o desconexión de las redes eléctricas de acuerdo con el horario.
- Asesoramiento personalizado a los clientes sobre el uso eficiente de la energía.
- Integración de los datos de consumo de energía con información generada por otros dispositivos, que permiten identificar elementos defectuosos o ineficientes.
- Apoyo para la atención social a las personas mediante el monitoreo de actividades y comportamientos dentro del hogar.
- Desagregación de la carga y apoyo a la automatización de los hogares.

Mediante la promulgación del SEC, se estableció un marco regulatorio robusto para el desarrollo de la gestión de la medición inteligente en Reino Unido. Sin embargo, su

implementación ha tenido dificultades relacionadas con el cumplimiento de metas de instalación de los medidores inteligentes, sobrecostos en la implementación del programa

y problemas técnicos asociados con el estándar tecnológico seleccionado, entre otros aspectos mencionados anteriormente<sup>29</sup>.

## Caracterización del uso de las tecnologías digitales en el sector de energía

Tradicionalmente la cadena de valor del sector eléctrico está compuesta por cuatro grandes eslabones asociados con las actividades involucradas en la prestación del servicio de energía: i) la generación de electricidad, que se produce en grandes plantas, tales como las hidroeléctricas y termoeléctricas; ii) el transporte de electricidad, que se realiza a través de líneas de transmisión; iii) la distribución a los usuarios finales, que son segmentados en residenciales, comerciales, industriales o de transporte; y iv) la comercialización de energía eléctrica, por la que se realizan transacciones de compra y venta de energía en el mercado mayorista para atender los requerimientos de energía de los usuarios finales (GEB, 2020). Bajo esta concepción, las TIC se han utilizado principalmente como una herramienta de apoyo para la administración y operación de las redes eléctricas (AIE, 2017)

Como consecuencia del desarrollo tecnológico, las TIC han adquirido una mayor relevancia en la gestión, operación y mantenimiento de los sistemas eléctricos, dando lugar al nuevo concepto de 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, así como optimizar tanto los gastos operativos (OPEX) de producción, transmisión y distribución de energía como disminuir los gastos de inversión (CAPEX) del sistema (Diamantoulakis et al., 2015). Estos cambios también han transformado la cadena de valor del sector al permitir el surgimiento de nuevos modelos de negocio y la consecuente incorporación de nuevos actores. El Foro Económico Mundial (WEF, 2016a) ha identificado principalmente cuatro aspectos de esta transformación (ver la Figura 3.7):

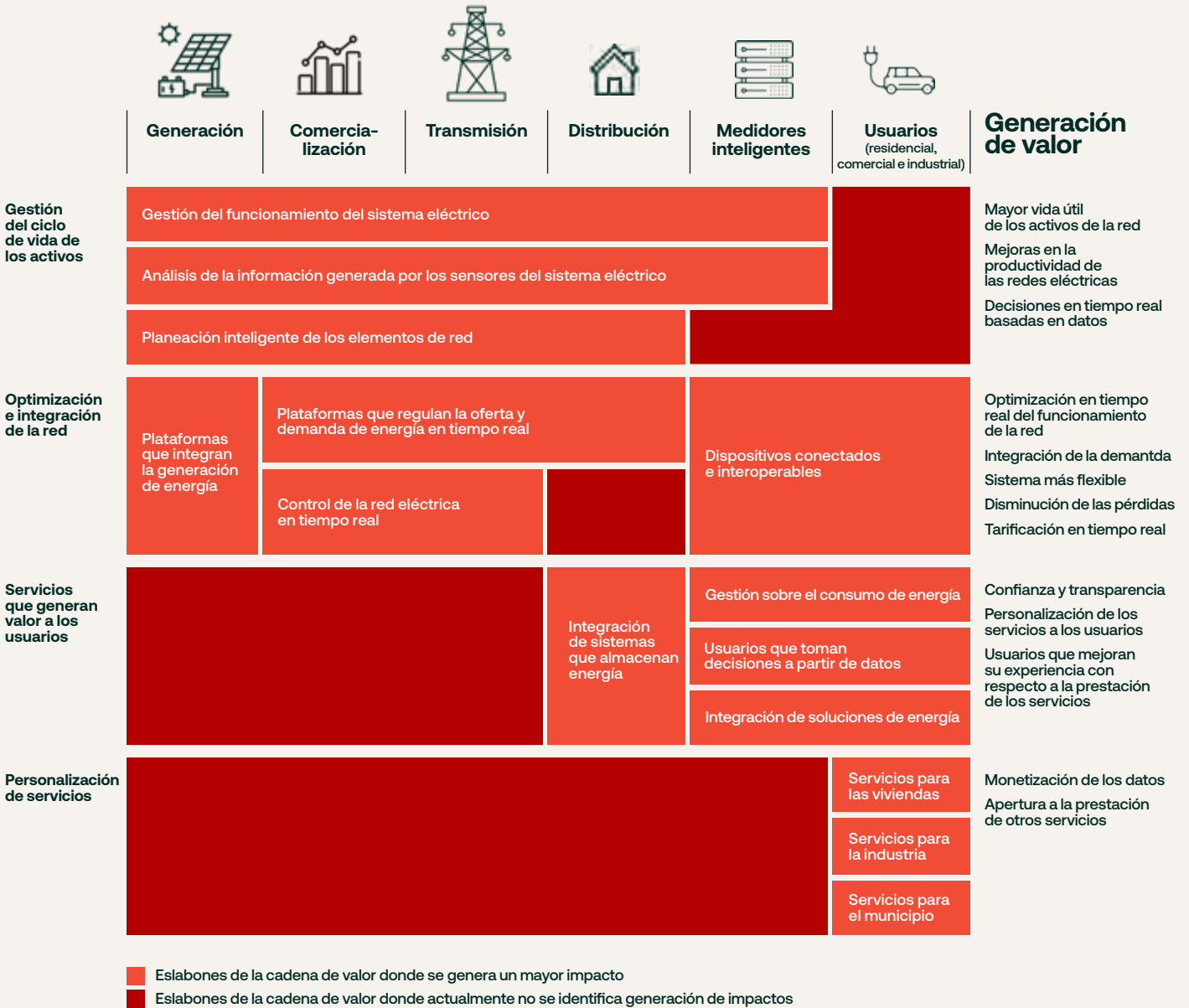
**1 Gestión del ciclo de vida de los activos.** La digitalización de las redes eléctricas ha permitido recopilar información en tiempo real sobre el funcionamiento del sistema eléctrico — reduciendo los tiempos de respuesta frente a la ocurrencia y detección de fallas—, analizar la estabilidad del sistema, la ocurrencia de transientes y la detección de pérdidas no

técnicas, entre otras tareas. Esto ha propiciado mejoras en la gestión, operación y mantenimiento de las redes, el aumento de la vida útil de los activos y mejoras en la productividad y la eficiencia operativa de la infraestructura de generación, transmisión y distribución utilizada para la prestación del servicio de energía eléctrica.

- 2 Optimización e integración de la red.** Los datos recopilados a partir de la digitalización de los diferentes elementos de la red eléctrica también han sido útiles para la planeación y diseño de las propias redes. Esto ha allanado el camino para el despliegue de recursos energéticos distribuidos, tales como sistemas de generación eléctrica de pequeña escala y elementos de almacenamiento de excedentes energéticos que suministran energía eléctrica al sistema cuando esta es requerida, mejorando su estabilidad.
- 3 Servicios integrados a los usuarios.** Los datos generados pueden utilizarse para identificar hábitos de consumo de los usuarios, elaborar perfiles de carga e identificar los DER, entre otros aspectos. De esta forma, permiten a las empresas prestadoras de servicios eléctricos empaquetar productos y servicios de generación y gestión de la energía eléctrica, dando la posibilidad de establecer tarifas horarias diferenciadas, gestionar los consumos y pagos de los clientes e incorporar al sistema la energía generada por los clientes, promoviendo un uso más eficiente de la misma.
- 4 Más allá del electrón.** La digitalización de las redes eléctricas también permite la personalización de los servicios prestados por los operadores de las redes eléctricas, los cuales se adaptarán y ajustarán a las necesidades y requerimientos de los clientes, haciendo que la electricidad pase de ser un elemento accesorio a una experiencia para los usuarios.

<sup>29</sup> Ver el apartado "Establecimiento de datos y comunicaciones en el Programa de Implementación de Medidores Inteligentes en Reino Unido".

Figura 3.7 — Generación de valor a partir de la digitalización de la infraestructura eléctrica



Fuente: Elaborado a partir de WEF (2016a).

A continuación, se describen las principales tecnologías de digitalización y los consecuentes cambios y transformaciones que se han venido experimentando en el sector de la energía.

### Tecnologías digitales para el diseño y la gestión de la infraestructura y los activos del sector

La digitalización de los sensores y la incorporación de medidores inteligentes en las redes eléctricas han permitido la recopilación de datos sobre el uso que se le da a la energía y las condiciones de operación de las redes eléctricas. Esta información es procesada mediante aplicaciones o algoritmos

de *big data*, analítica de datos e inteligencia artificial. Sus resultados se utilizan para mejorar la gestión, la operación y el mantenimiento de los sistemas eléctricos y optimizar el uso de la energía, propiciando el entorno adecuado para el desarrollo de redes inteligentes.

Figura 3.8 — Componentes para la mejora del diseño y la planeación de las redes eléctricas mediante la digitalización y el desarrollo de redes inteligentes



Fuente: Elaborado a partir de AIE (2020b).

En el Cuadro 3.4 se presentan las principales tecnologías para la recopilación de datos sobre el funcionamiento de la red eléctrica.

**Cuadro 3.4 — Sistemas de recolección de datos de redes inteligentes**

<b>Dispositivo inteligente</b>	<b>Tecnología</b>	<b>Aplicación</b>
Infraestructura de medición inteligente (AMI)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Integración de medidores inteligentes</li> <li>– Sistemas de gestión de datos y redes que proporcionan comunicación bidireccional entre los clientes y las empresas prestadoras de servicios públicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Lectura y operación remota</li> <li>– Ahorro de los costos de operación</li> <li>– Menores desplazamientos del personal operativo</li> <li>– Monitoreo de los flujos de energía en las redes</li> <li>– Configuración remota del medidor</li> <li>– Tarifas dinámicas</li> <li>– Monitoreo de la calidad de la energía</li> <li>– Control local</li> <li>– Reducción de pérdidas no técnicas</li> <li>– Tarifación horaria según requerimientos de la demanda de energía</li> <li>– Facilita la integración de los DER</li> <li>– Promueve la generación de nuevos actores y formas de negocio</li> <li>– Aplanamiento de las curvas de demanda de energía</li> </ul>
Automatización de la red de distribución (ADA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Unidades terminales remotas (<i>remote terminal unit</i> o UTR): dispositivo controlado por microprocesadores que transmite datos de telemetría</li> <li>– Control de la supervisión y adquisición de datos (<i>supervisory control and data acquisition</i> o SCADA) que permite la gestión automática y manual</li> <li>– Dispositivos electrónicos inteligentes (<i>intelligent electronic device</i> o IED), que realizan el monitoreo y registro de cambios de estado en la subestación y los alimentadores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Recopilación de información sobre el estado operativo del sistema</li> <li>– Sistema de monitoreo, procesamiento de eventos y alarmas</li> <li>– Detección y localización de fallas</li> <li>– Operación remota de los elementos de la red eléctrica (telemando)</li> <li>– Autorrecuperación de la red</li> <li>– Reconfiguración automática de la red de acuerdo con los flujos de energía, los requerimientos de la demanda y el estado de la topología de la red</li> <li>– Combinación de diferentes funciones de protección de relé con medición, grabación y monitoreo</li> </ul>
Unidad medidora de fase (PMU)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mediciones en tiempo real (entre 30 y 60 muestras/segundo) de múltiples puntos remotos con sincronización por medio de una fuente de tiempo común</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Medición de la onda eléctrica</li> </ul>
Sistemas de monitoreo de área amplia ( <i>wide area monitoring system</i> o WAMS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Servidor de aplicaciones para manejar la información reportada por las PMU</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Estabilidad dinámica de la red eléctrica</li> </ul>

Fuente: Elaborado a partir de BID (2016) y Zhang et al. (2018).

La implementación de estas tecnologías genera una gran cantidad de datos sobre el funcionamiento de la red eléctrica. Así mismo, permite gestionar el desarrollo de DER, la incorporación de energías renovables (como las de fuentes eólicas y celdas fotovoltaicas), la masificación del uso de vehículos eléctricos como medio de transporte y el aumento de la demanda de energía como consecuencia de la integración al sistema eléctrico de estos servicios. Adicionalmente, posibilita gestionar el suministro de electricidad a las redes de

distribución de baja tensión a partir de la energía almacenada para atender las nuevas problemáticas y los retos que estos servicios plantean a las redes eléctricas. En este contexto, la información recopilada se convierte en un activo vital para la gestión, operación y mantenimiento de los procesos de generación, transmisión, distribución y consumo de electricidad.

Estas tecnologías requieren que el sector eléctrico utilice técnicas avanzadas para analizar la información recopilada. Además, necesitan incorporar datos de otras fuentes, tales como los contenidos en los sistemas de información geográfica y meteorológicos. A partir de ellos, se pueden obtener resultados con los cuales los administradores de las redes pueden evaluar su desempeño y tomar decisiones en tiempo real para mejorar tanto su gestión, operación y mantenimiento como la calidad del servicio prestado a los usuarios del servicio de electricidad.

## Tecnologías digitales aplicadas a las infraestructuras y los activos considerando las capas de dispositivos o sensores, la recolección y el procesamiento de datos y sus aplicaciones

El desarrollo e implementación de las redes inteligentes se basa en una arquitectura compuesta por cinco capas:

- 1 Capa de energía.** Esta primera capa está conformada por los eslabones tradicionales de la cadena de valor de la prestación de los servicios de energía: i) la generación de electricidad; ii) el transporte de electricidad a través de las líneas de transmisión; iii) la distribución a los clientes finales por medio de las redes de distribución; y iv) los usuarios de la energía eléctrica.
- 2 Capa de control.** Esta capa comprende los elementos a través de los cuales se miden y controlan los parámetros de operación y funcionamiento de la red eléctrica (voltaje, frecuencia, la potencia reactiva del sistema, etc.). Entre esos elementos están los medidores inteligentes, las unidades medidoras de fase, los sistemas de monitoreo de área amplia, las unidades terminales remotas y los dispositivos electrónicos inteligentes.
- 3 Capa de conectividad.** Involucra a las redes y protocolos de comunicación a través de los cuales se transportan las señales desde los dispositivos de medición y control hasta los centros de operación de las redes eléctricas y viceversa. Existen diferentes modelos conceptuales para describir las arquitecturas de comunicación utilizadas por las redes inteligentes. Entre ellas, se destacan las propuestas por CEN, CENELC y ETSI (2014), NIST (2014) y Kuzlu et al. (2014).

De acuerdo con estas propuestas, existen principalmente tres tipos de arquitecturas que soportan las redes inteligentes:

- Redes de área amplia (*wide area network* o WAN). Se caracterizan por brindar conectividad a las actividades de generación y transmisión, interoperando con los sistemas de comunicación de las redes de distribución y los centros de

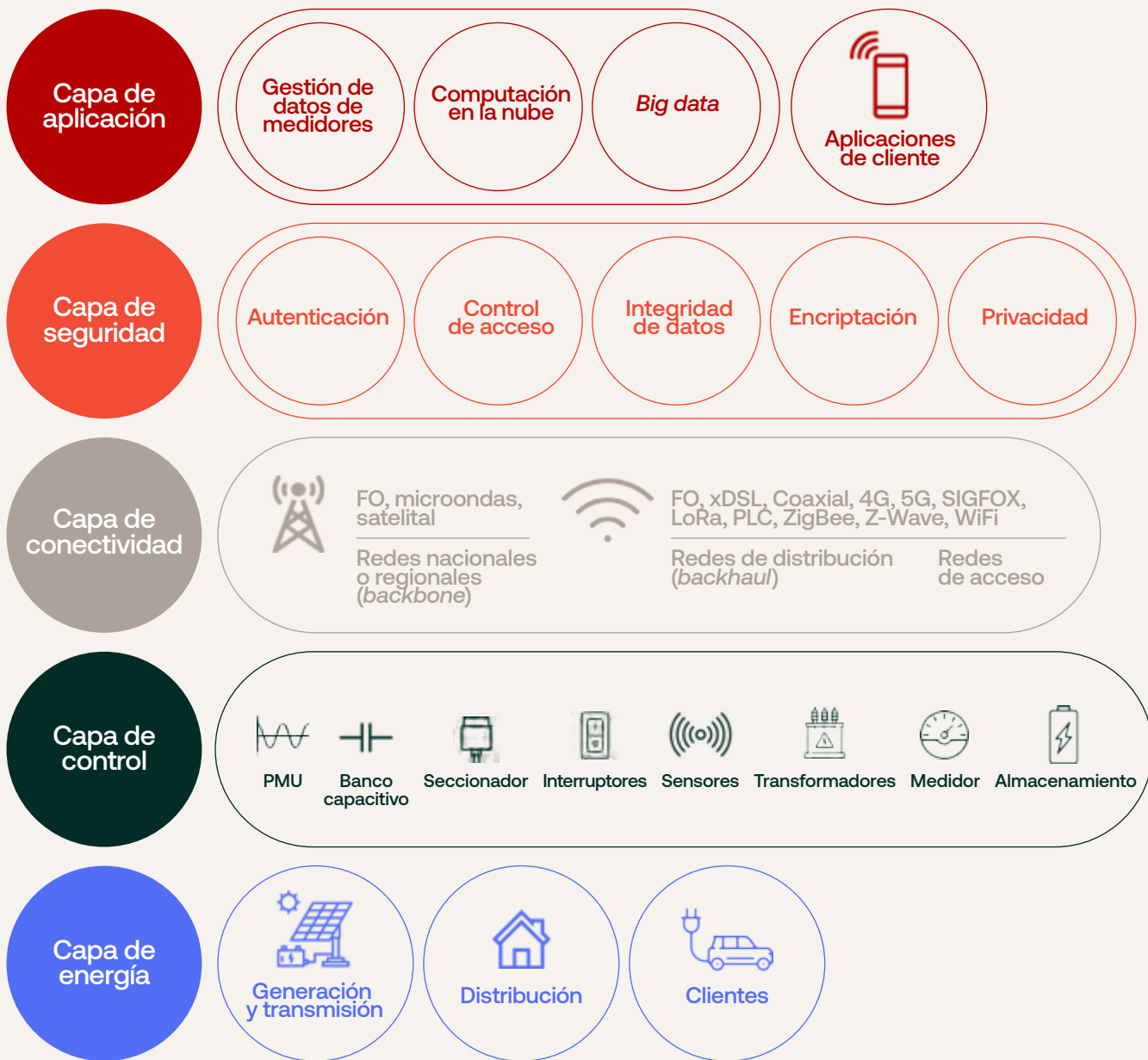
operación. Estas redes tienen coberturas a nivel nacional o regional (*backbone*) y utilizan tecnologías que operan en fibra óptica, enlaces de microondas o conexiones satelitales

- Redes de distribución, ya sean de cercanías (*neighborhood area network* o NAN) o redes que conectan multitud de dispositivos en un área geográfica determinada (*field area network* o FAN). Estas redes soportan la conectividad requerida por los elementos de medición y control de la red de distribución de energía eléctrica. La comunicación se logra utilizando tecnologías alámbricas (fibra óptica, xDSL, cable coaxial, PLC, etc.) o inalámbricas (2G, 3G, 4G, WiMax, etc.), empleadas para el acceso a las redes de telecomunicaciones.
- Redes de acceso, que pueden estar en los hogares (*home area network* o HAN), los edificios (*building area network* o BAN) o en áreas industriales (*industrial area network* o IAN). Son redes utilizadas para proveer conectividad a los clientes finales y utilizan tecnologías alámbricas (como fibra óptica, xDSL y cable coaxial), inalámbricas (como redes en malla, zigbee, LoRa, SigFox, Z-wave y wifi) o celulares (2G, 3G, 4G o WiMAX).

- 4 Capa de seguridad.** Corresponde a elementos de *hardware* y *software* que garantizan la integridad, confidencialidad y disponibilidad de los datos y la información recopilada por las redes inteligentes. Comprende, entre otras, las funciones de autenticación y control del acceso de los usuarios, integridad de los datos, encriptación y privacidad de la información.
- 5 Capa de aplicación.** Corresponde a las aplicaciones desarrolladas para el funcionamiento de la infraestructura avanzada de medición, el análisis y almacenamiento de los datos recopilados (*big data*, computación en la nube, IA) y otros tipos de aplicaciones de redes inteligentes utilizadas por los usuarios finales.



Figura 3.9 — Esquemas y tecnologías digitales aplicados a infraestructuras y activos del sector de la energía eléctrica



Fuente: Elaborado a partir de CEN, CENELEC y ETSI (2014), NIST (2014) y Kuzlu et al. (2014)

## Tecnologías digitales para la desintegración de procesos y la obtención de eficiencias

La implementación de las tecnologías de AMI y ADA posibilita y promueve el desarrollo de los DER y los vehículos eléctricos (Zhang et al., 2018; BID, 2016).

Los AMI permiten a los usuarios realizar la lectura y operación remota del consumo de energía, lo cual se traduce en ahorros de los costos de operación, al disminuir los desplazamientos del personal operativo. Además, suministran a los operadores de las redes información sobre los flujos de energía. Esta tecnología también posibilita el establecimiento de tarifas horarias, consultas en tiempo real sobre el consumo y la gestión activa de las cargas mediante la conexión o desconexión de circuitos por parte de los operadores de las redes eléctricas.

Con la tecnología ADA se pueden realizar operaciones de telemando de forma automática, detectar y localizar fallas y reconfigurar automáticamente la red de acuerdo con los flujos de energía y el estado de la topología. Con ello se alargará la vida útil de los elementos y mejorará la resiliencia de la infraestructura y la confiabilidad de la prestación del servicio de energía.

La principal funcionalidad de los DER es incorporar a las redes de baja tensión los excedentes de energía eléctrica producida por los sistemas de generación instalados por los consumidores, tales como fuentes fotovoltaicas o sistemas eólicos, implementadas en principio para satisfacer sus propias necesidades energéticas. Esta funcionalidad también es provista por los VE, los cuales, además de ser consumidores naturales de energía, podrán utilizarse como fuentes de suministro de electricidad, al permitir la generación de potencia eléctrica a partir de la energía almacenada en sus baterías (Zhang et al., 2018).

## Valor agregado y potencial de desarrollo de los nuevos servicios

El desarrollo e implementación de las redes inteligentes permitirán la creación de nuevas fuentes de generación de valor no solo económico, sino también social (Niesten y Alkemade, 2016). Ello contribuirá a alcanzar algunos de los objetivos de desarrollo sostenible definidos por las Naciones Unidas (2020).

La implementación de la AMI ayudará a los usuarios a tener un mayor control sobre sus consumos de energía y al establecimiento de tarifas diferenciales que promuevan la reducción de los consumos de energía en las horas de mayor demanda y el incremento en las horas de bajo consumo, aplanando las curvas de demanda.

Estas tecnologías transformarán el esquema a través del cual se prestaba el servicio de energía eléctrica. Así, se pasará de sistemas centralizados de generación, caracterizados por grandes plantas productoras de energía, como hidroeléctricas o termoeléctricas, a sistemas de generación distribuida. Estos sistemas permitirán la desagregación de las redes y la creación de microrredes, a través de las cuales se suministrará electricidad a un grupo específico de usuarios, mediante el uso de inversores de generación distribuida (*inverter interfaced distributed generators* o IIDG). Así mismo, reducirán la distancia entre las unidades generadoras y los puntos de recarga de electricidad, lo que permitirá mejorar la confiabilidad del suministro de energía eléctrica y reducir las pérdidas de transmisión. 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 realicen en el parque de generación de electricidad (Zhang et al., 2018; WEF, 2016a).

Sin embargo, la gestión de las redes eléctricas se está haciendo aún más compleja por las características de intermitencia de generación de las fuentes de energía renovables, como consecuencia de su dependencia de la variabilidad meteorológica y los flujos de energía derivados de la implementación de las tecnologías DER y de VE, por la dificultad de detectar fallas en las microrredes. Para superar esa dificultad, es necesario utilizar técnicas avanzadas de análisis de *big data*, inteligencia artificial y mejoras en la capacidad de procesamiento de los datos recopilados a través de los sistemas de medición y gestión desplegados en las redes inteligentes, capaces de solucionar estas problemáticas.

Por su parte, el desarrollo de los DER y de VE traerá efectos positivos sobre el medio ambiente al reducir las emisiones de gas carbónico (CO<sub>2</sub>), haciendo un uso más extensivo de las fuentes de energía renovable. Los efectos también serán resultado de los cambios en los hábitos de consumo de los usuarios, aplanando las curvas de demanda de energía, y la disminución de la huella de carbono generada por los vehículos que funcionan con combustibles fósiles. Adicionalmente, el desarrollo de las redes inteligentes permitirá la creación de nuevos modelos de negocio, descritos en el apartado anterior, los cuales conllevarán la aparición de nuevos actores, que se beneficiarán de las oportunidades ofrecidas por la implementación de las tecnologías de los DER y VE. La

generación de energía a través de fuentes renovables o de vehículos eléctricos promoverá en particular la aparición de agregadores. Estos se encargarán de reunir varios sistemas de generación para comercializar la energía producida a través de estas dos fuentes y sacar provecho de las economías de escala, como, por ejemplo, en la comercialización de baterías

para los VE en los modelos de negocio basados en servicios del vehículo a la red y viceversa (V2G y G2V, por sus siglas en inglés). En el Cuadro 3.5 se presenta un resumen de la generación de valor con la implementación y desarrollo de las redes inteligentes.

**Cuadro 3.5 — Generación de valor a partir de la implementación y desarrollo de las redes inteligentes**

<b>Servicios</b>	<b>Valor para el consumidor</b>	<b>Valor para el operador de red</b>
V2G y G2V	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Beneficios medioambientales</li> <li>– Beneficios económicos</li> <li>– Aumento de la participación en el sistema eléctrico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Da mayor estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico</li> <li>– Mejora la operación y el balance entre la oferta y demanda de energía</li> <li>– Reduce la demanda máxima de consumo de energía</li> </ul>
Respuesta a la demanda	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Reducción del uso de energía</li> <li>– Reducción de la factura del servicio de energía</li> <li>– Mejora del control sobre el consumo de energía</li> <li>– Aumento de la satisfacción del consumidor</li> <li>– Beneficios medioambientales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Disminuye la demanda máxima de consumo de energía</li> <li>– Incrementa la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico</li> <li>– Mejora el acceso a la energía regulada</li> <li>– Optimiza la operación de las redes eléctricas</li> <li>– Reduce las pérdidas y los costos de operación del sistema</li> <li>– Mejora la calidad y seguridad del suministro eléctrico</li> <li>– Proporciona beneficios medioambientales</li> </ul>
Integración de energías renovables	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Reducción del uso de energía</li> <li>– Beneficios económicos</li> <li>– Beneficios medioambientales</li> <li>– Mejora del control sobre el consumo de energía</li> <li>– Mejora del control sobre la facturación del servicio de energía</li> <li>– Aumento de su participación en el sistema eléctrico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Reduce la demanda máxima de consumo de energía</li> <li>– Mejora el acceso a los mercados regulados de energía</li> <li>– Mejora la confiabilidad del suministro de energía y de la red</li> <li>– Mejora la operación de las redes</li> <li>– Mejora la seguridad y estabilidad de la red</li> <li>– Demora las inversiones en redes eléctricas</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia a partir de Niesten y Alkemade (2016).

La incorporación de técnicas avanzadas de análisis y procesamiento de los datos masivos recopilados por estas tecnologías permitirán el desarrollo de nuevos modelos de negocio. Entre ellos, están los siguientes (Zhang et al., 2018):

**1 Servicios de vehículos a la red (V2G) y de la red a los vehículos (G2V).** Consiste en modelos de negocio basados en, por una parte, la venta de la energía eléctrica almacenada en las baterías de los VE en el mercado mayorista o a los operadores de las redes eléctricas (V2G) y, por otra, la compra de energía eléctrica para cargar las baterías de los vehículos eléctricos (G2V).

**2 Servicios de respuesta a la demanda.** En este modelo los comercializadores de energía o los operadores de redes eléctricas establecen esquemas o incentivos que tienen como propósito que los consumidores ajusten sus hábitos de consumo de electricidad, aplanar las curvas de demanda

y mejorar la calidad y eficiencia del funcionamiento del sistema eléctrico. Entre los incentivos posibles están la implementación de tarifas diferenciales o el ofrecimiento de compensaciones monetarias, independientes a las tarifarias, a los clientes que permitan el control de sus consumos a través del encendido o apagado remoto de sus equipos o electrodomésticos.

**3 Servicios para la integración de energías renovables.** Para esta categoría de servicio, existen principalmente dos tipos de modelos de negocio. El primero se centra en conectar las fuentes de energías renovables a las redes de distribución y el segundo a mejorar las capacidades de gestión que tienen las compañías de energía y los operadores de redes para integrar los DER y VE como fuentes, aumentando de esta manera la cantidad de energía renovable que se incorpora al sistema eléctrico.

El primer tipo de modelo de negocio puede desarrollarse de varias formas: i) emprendimientos que alientan la instalación de fuentes de energía renovables a los usuarios, entregando estos elementos de generación bajo la modalidad de *leasing*, con el fin de comercializar posteriormente la energía producida por estas fuentes; y ii) servicios ofrecidos por compañías de energía establecidas, que proponen conexión y acceso a las redes eléctricas a pequeños consumidores que generan energía a partir de fuentes renovables.

El segundo tipo de modelo de negocio se enfoca en incrementar la cantidad de energía renovable que se incorpora al sistema eléctrico, reduciendo los efectos adversos que tiene la intermitencia de generación, característica de estas fuentes. Específicamente, la capacidad de generación de energía eléctrica de las fuentes solares y eólicas no es constante durante el día, lo que resulta en picos y valles de electricidad en el sistema. Esa característica crea una nueva necesidad para los operadores de redes eléctricas, consistente en reducir estas diferencias de capacidad de generación, con el fin de mejorar tanto el balance entre la oferta y la demanda de energía como la confiabilidad del suministro eléctrico. Existen varios mecanismos a través de los cuales se pueden alcanzar estos objetivos:

- Establecimiento de tarifas dinámicas para la compra y venta de energía generada por los DER. Estos esquemas de tarificación permiten a los clientes finales disminuir la facturación por la prestación de los servicios de energía, aumentando su consumo cuando los precios de energía son bajos y disminuyendo los requerimientos de energía cuando los precios son altos. Esta dinámica fomenta

que los clientes finales que tengan fuentes de energía renovables consuman la electricidad generada por estos sistemas principalmente en los horarios en los que los precios ofertados por los operadores de redes estén en su tope y, por consiguiente, llevará a la disminución de los picos de carga, lo que también reducirá la capacidad de reserva operativa de los sistemas eléctricos.

- Servicios que permitan balancear la oferta y la demanda de energía mediante la implementación de sistemas de gestión, equipo y tecnologías DER; en este caso se cobra una tarifa por la prestación de estos servicios a los usuarios que tienen instalados sistemas de generación de energía.
- Servicios de gestión activa en las redes de distribución de energía, que permite a los proveedores de estos sistemas comercializar la energía generada en el mercado mayorista cuando los precios están altos.
- Comercializar la energía almacenada en los VE, cuyo modelo de negocio consiste en cargar las baterías de los vehículos cuando la oferta de energía generada por las fuentes renovables es alta y, en consecuencia, los precios de la electricidad son bajos, para posteriormente vender esta energía conectando los VE a la red (V2G) cuando las tarifas de consumo sean altas.

En el Cuadro 3.6 se presenta un resumen de las tecnologías, los nuevos negocios y servicios que permitirá la implementación de la digitalización de infraestructura en el sector de la energía eléctrica, así como los factores que actuarán como motores para su desarrollo.

**Cuadro 3.6 — Tecnología, nuevos negocios y servicios que promoverán la digitalización del sector eléctrico**

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

# Identificación de los costos de la digitalización del sector de la energía eléctrica

Como se expuso en la sección anterior, la arquitectura de las redes inteligentes (*smart grids*) es compleja, tecnológicamente diversa y con numerosos elementos distribuidos a lo largo de la red.

Para cada una de las capas de esa arquitectura, presentadas en la Figura 3.9, se pueden identificar equipos y aplicaciones que determinan los costos incrementales de CAPEX y OPEX que supone la digitalización de la infraestructura y los activos funcionales del sector de la energía eléctrica. Estos costos incrementales se establecen a partir de los componentes de digitalización y de las funciones que se implementarán en las infraestructuras del sector eléctrico. Estas se identifican mediante los diseños técnicos y trabajos de ingeniería detallados, que permiten estimar los costos y cronogramas

de implementación requeridos para cumplir con los objetivos y las proyecciones de demanda del proyecto.

Los costos detallados de los equipos o aplicaciones específicos a utilizar en un proyecto dependen de múltiples variables, desde las especificaciones técnicas precisas hasta la selección del fabricante, pasando por factores que influyen los precios, como el país donde se implementa y las economías de escala y alcance del proyecto. Considerando lo anterior, en el Cuadro 3.7 se identifican los equipos, aplicaciones, funcionalidades y principales factores que determinan el costo de los diferentes componentes en cada una de las capas de los proyectos en el sector eléctrico.

**Cuadro 3.7 — Equipos, aplicaciones, funcionalidades y motores de costos (CAPEX y OPEX) para la digitalización de los proyectos de infraestructura del sector eléctrico**

Equipo o aplicación	Funcionalidades	Determinantes de los costos
<b>Capa de energía</b>		
Fuentes de generación eólica	Generación de energía eléctrica a partir de la transformación de la energía cinética del viento	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cantidad estimada de fuentes de generación eólica que serán desplegadas</li> <li>– Capacidad de generación</li> <li>– Capacidad de almacenamiento</li> <li>– Ubicación geográfica de la fuente de generación eólica y costos asociados al transporte, la instalación y la obra civil</li> </ul>
Fuentes de generación solar	Generación de energía eléctrica a partir de la radiación electromagnética del Sol	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cantidad estimada de fuentes de generación solar que serán desplegadas</li> <li>– Capacidad de generación</li> <li>– Capacidad de almacenamiento</li> <li>– Ubicación geográfica de la fuente de generación eólica y costos asociados al transporte, la instalación y la obra civil</li> </ul>
Inversores inteligentes	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Transformación de la corriente directa en corriente alterna</li> <li>– Control automático de entrada o salida de fuentes generadoras de energía distribuida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cantidad de fuentes eólicas o solares o vehículos eléctricos que entrarán al parque de generación eléctrica</li> <li>– Especificaciones técnicas de los inversores inteligentes</li> <li>– Costos de instalación de los equipos</li> </ul>
Vehículos eléctricos	Almacenamiento de energía eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cantidad estimada de vehículos eléctricos</li> <li>– Capacidad de almacenamiento</li> <li>– Cantidad de puntos de carga de los vehículos eléctricos</li> <li>– Ubicación geográfica de los puntos de carga y costos asociados a la instalación y obra civil</li> </ul>

(continúa)

Equipo o aplicación	Funcionalidades	Determinantes de los costos
<b>Capa de control</b>		
<b>Red de distribución</b>		
Sistemas de comunicación y control de recursos de energía distribuida (DERMS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Control y gestión automática de entrada o salida de fuentes generadoras de energía distribuida</li> <li>– Integración con sistemas de gestión de redes de distribución</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cantidad de fuentes eólicas, solares o vehículos eléctricos que entrarán al parque de generación eléctrica</li> <li>– Características técnicas de los DERMS</li> <li>– Costo de instalación de los equipos</li> </ul>
Medidores inteligentes y de lectura remota (AMI y AMR) y concentradores	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Intercambio unidireccional de información desde el usuario hacia el prestador del servicio de energía eléctrica para la lectura del consumo (AMR) y, en casos bidireccionales, información tarifaria del prestador al usuario (AMI)</li> <li>– Medición unidireccional (AMR) o bidireccional (AMI) en el caso de implementación de recursos de energía distribuida</li> <li>– Tarifación diferenciada por franjas horarias</li> <li>– Implementación de esquemas de prepago de consumo de energía eléctrica</li> <li>– Conexión o desconexión del suministro de energía</li> <li>– Detección y notificación de interrupciones del servicio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Tamaño de la población donde se realizará el proyecto</li> <li>– Características y funcionalidades de los medidores: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Medición unidireccional o bidireccional</li> <li>• Funcionalidades del intercambio de información: unidireccional (desde el usuario hacia el prestador del servicio) o bidireccional (desde el usuario hacia el prestador y viceversa)</li> <li>• Facilidades de tarifación por franjas horarias</li> <li>• Conexión o desconexión remota del suministro de energía</li> <li>• Detección y notificación de interrupciones del servicio</li> <li>• Otras</li> </ul> </li> <li>– Áreas geográficas cubiertas</li> <li>– Densidad poblacional</li> <li>– Características de las zonas geográficas donde se desplegará la infraestructura (urbanas, suburbanas y rurales)</li> <li>– Penetración estimada de AMI por año</li> <li>– Costos de instalación de los medidores</li> </ul>
Unidades terminales remotas (UTR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Control de elementos de las redes eléctricas</li> <li>– Transmisión de los datos de telemetría de las redes eléctricas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cantidad de elementos de la red de distribución que serán automatizados: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transformadores</li> <li>• Seccionadores</li> <li>• Subestaciones</li> <li>• Otros</li> </ul> </li> </ul>
Dispositivos electrónicos inteligentes	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Gestión de los elementos de la capa de control de las redes eléctricas</li> <li>– Comunicación bidireccional con sistemas SCADA y otros dispositivos electrónicos inteligentes</li> <li>– Ajuste automático para la operación eficiente de la red eléctrica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Características técnicas de las UTR y de los dispositivos electrónicos inteligentes</li> <li>– Costos de instalación por equipo</li> </ul>
Control de la supervisión y adquisición de datos (SCADA)	Control y supervisión remota de la operación y funcionamiento de las redes eléctricas	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Número de licencias de uso</li> <li>– Características de los sistemas SCADA</li> <li>– Costo de instalación por equipo</li> <li>– Actualizaciones</li> </ul>
<b>Red de transmisión</b>		
Unidades medidoras de fase (PMU)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Medición de la amplitud y fase del voltaje y la corriente eléctrica</li> <li>– Detección de transientes en las redes de transmisión de energía eléctrica</li> <li>– Control de relés de protección</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cantidad de PMU que serán desplegadas</li> <li>– Características técnicas de las PMU</li> <li>– Costo de instalación por equipo</li> </ul>
<b>Seguridad</b>		
Cámaras de monitoreo	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Monitoreo y vigilancia de los activos críticos de los sistemas eléctricos</li> <li>– Prevención del acceso a zonas restringidas</li> <li>– Reconocimiento facial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Emplazamientos que requieren control de entrada y salida de personal (activos críticos y zonas de acceso restringidas)</li> <li>– Cantidad estimada de cámaras requeridas por sitio</li> <li>– Características técnicas de las cámaras de monitoreo y resolución de la imagen</li> </ul>

(continúa)

Equipo o aplicación	Funcionalidades	Determinantes de los costos
<b>Capa de conectividad</b>		
<b>Redes propias</b>		
Estaciones base	Tecnologías y redes de comunicación a través de las cuales se transportan las señales desde los dispositivos de medición y control hasta los centros de operación de las redes eléctricas y viceversa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Áreas geográficas que deberán cubrir las redes</li> <li>- Tecnologías utilizadas</li> <li>- Cantidad de medidores inteligentes (AMI) desplegados por año</li> <li>- UTR desplegadas por año</li> <li>- PMU desplegadas por año</li> <li>- Inversores inteligentes desplegados por año</li> <li>- DERMS desplegados por año</li> <li>- Otros dispositivos electrónicos Inteligentes desplegados por año</li> <li>- Otros emplazamientos con dispositivos que requieran transmitir información</li> <li>- Periodicidad de transmisión de la información</li> <li>- Volumen de datos generados por los dispositivos desplegados</li> <li>- Servicios que prestarán a través de las redes desplegadas (voz o datos)</li> <li>- Tráfico máximo de voz y datos que se cursará por la red</li> <li>- Ancho de banda requerido para la transmisión de servicios de voz o datos</li> <li>- Bandas de frecuencia de espectro radioeléctrico utilizadas (libres o licenciadas)</li> <li>- Niveles de calidad y servicios requeridos</li> <li>- Costos de transporte, instalación y obra civil</li> </ul>
Fibra óptica		
Enlaces microondas		
Enlaces satelitales		
Otros equipos de comunicación		
<b>Redes de terceros</b>		
Contratación de servicios de telecomunicaciones (voz o datos, canales dedicados u otros)	Servicios contratados de telecomunicaciones para transportar las señales desde los dispositivos de medición y control hasta los centros de operación de las redes eléctricas y viceversa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Áreas geográficas donde se requerirá la prestación de los servicios</li> <li>- AMI desplegados por año</li> <li>- Unidades terminales remotas desplegadas por año</li> <li>- PMU desplegadas por año</li> <li>- Inversores Inteligentes desplegados por año</li> <li>- DERMS desplegados por año</li> <li>- Otros dispositivos electrónicos Inteligentes desplegados por año</li> <li>- Servicios que se contratarán (voz o datos).</li> <li>- Volumen de datos generados por los servicios contratados</li> <li>- Tráfico máximo de voz y datos que se cursará por la red</li> <li>- Niveles de calidad y servicios requeridos</li> <li>- Costo mensual por tipo de enlace según el volumen de datos de los servicios contratados</li> <li>- Cantidad y elementos de infraestructura que se arrendarán (torres, postes, espacios físicos, etc.)</li> <li>- Tarifas de arrendamiento (torres, espacios físicos, etc.)</li> </ul>
Arrendamiento de infraestructura	Arrendamiento de infraestructura de terceros para la instalación o despliegue de equipos que transportan las señales desde los dispositivos de medición y control hasta los centros de operación de las redes eléctricas y viceversa	
<b>Capa de seguridad</b>		
Equipos de control y acceso a los usuarios	Equipos electrónicos que permiten el acceso a zonas restringidas según el tipo de usuario	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cantidad de usuarios y tipos de acceso por usuario</li> <li>- Emplazamientos que requieren control de entrada y salida de personal</li> <li>- Cantidad estimada de equipos de control y acceso por sitio</li> <li>- Tecnologías utilizadas para el control y acceso a los usuarios</li> </ul>
Equipos de cómputo o computación en la nube (servidores, sistemas de almacenamiento)	Equipos de cómputo y aplicaciones para: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Garantizar la integridad, confidencialidad y disponibilidad de los datos y la información recopilada por las redes inteligentes. Comprende, entre otras, las funcionalidades de autenticación y control de acceso de los usuarios, integridad de los datos, encriptación y privacidad de la información</li> <li>- Prevenir ataques que amenacen la seguridad e integridad de los sistemas informáticos utilizados para gestionar la prestación del servicio eléctrico a los usuarios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cantidad de usuarios con permiso de acceso a lugares restringidos y tipos de acceso por usuario</li> <li>- Cantidad de datos generados y capacidad de almacenamiento de los equipos</li> <li>- Capacidad de cómputo de los equipos</li> <li>- Sistemas y equipos informáticos que requieren redundancia</li> <li>- Licencias de las aplicaciones de ciberseguridad requeridas</li> <li>- Licencias de aplicaciones para el control de entrada y salida de personal</li> </ul>
Aplicaciones de ciberseguridad		

(continúa)

Equipo o aplicación	Funcionalidades	Determinantes de los costos
<b>Capa de aplicación</b>		
Equipos de cómputo o computación en la nube (servidores, sistemas de almacenamiento)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Dispositivos de procesamiento y almacenamiento, así como <i>software</i> y aplicaciones que permiten tanto analizar la información recopilada como administrar y controlar los elementos de los sistemas automáticos de medida o generación distribuida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Número de usuarios</li> <li>– Volumen de información promedio y capacidad de almacenamiento de los equipos</li> <li>– Capacidad de cómputo de los equipos</li> </ul>
<i>Software</i> y aplicaciones para el procesamiento de datos	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Equipos de cómputo y aplicaciones que utilizan técnicas de procesamiento avanzadas de <i>big data</i> para analizar la información recopilada de los diferentes elementos de la capa de control de las redes inteligentes y facilitar los procesos de toma de decisiones</li> <li>– Equipos de cómputo y aplicaciones que utilizan técnicas de procesamiento avanzadas de inteligencia artificial para analizar la información recopilada, controlar los diferentes elementos de la capa de control de las redes inteligentes y facilitar los procesos de toma de decisiones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Licencias de aplicaciones para el control de dispositivos</li> <li>– Licencias de las aplicaciones requeridas (sistemas de información asociados con sistemas automáticos de medida y generación distribuida, <i>big data</i>, analítica de datos, IA, otras) y esquema de licenciamiento utilizado</li> </ul>

## Identificación de los beneficios de la digitalización del sector de la energía eléctrica

A continuación, se presentan los beneficios económicos que ofrecen los proyectos de digitalización de las redes eléctricas y la habilitación de generación con recursos descentralizados

de fuentes renovables. En cada caso se explican las causas del beneficio y se presenta la metodología de evaluación económica aplicada para su cuantificación.

### Reducción en los cortes de suministro

#### ¿Por qué se reducen los cortes de energía?

Las redes inteligentes cuentan con equipos que permiten monitorear y regular los parámetros de la corriente y la condición de los equipos (IRENA, 2015)<sup>30</sup>. De esta forma, las redes tienen capacidad para suavizar picos de voltaje que afectan la vida útil de los elementos de red y, en casos extremos, pueden derivar en cortes del suministro. Por otra parte, con el monitoreo remoto de las condiciones de operación de los elementos de red, es posible anticipar fallas y optimizar las rutinas de mantenimiento preventivo. De esta forma, la red opera bajo condiciones más estables y es menos probable que los equipos presenten daños que se traduzcan en interrupciones del servicio.

#### ¿Cómo se cuantifican los beneficios económicos por reducción de cortes?

Un corte de energía eléctrica genera perjuicios diferentes para cada agente involucrado. Para el operador de la red, el corte del servicio representa menores ingresos por la reducción de las ventas en el intervalo de tiempo en que se suspende el servicio. Desde la perspectiva del operador de la red, el beneficio se puede estimar simplemente como la energía que se deja de facturar, valorada al precio promedio del kWh.

Esta aproximación subestima el valor económico de los cortes de suministro de energía. Para usuarios industriales, por ejemplo, el costo de un corte de energía se valora como el sacrificio en utilidad asociado con los bienes que dejaron de producir durante la interrupción del servicio, el deterioro

<sup>30</sup> En el reporte de IRENA, por ejemplo, se asume que los inversores basados en voltaje y potencia reactiva (volt-VAR) reducen en un 10 % las fallas de los equipos.



de productos que requieran energía para su conservación y eventuales costos asociados con el incumplimiento de contratos. Si el industrial tiene un generador de respaldo, el valor económico de la interrupción se mide como el diferencial entre la tarifa que ofrece el operador de la red y el costo marginal de la generación con la planta de respaldo.

La interrupción del suministro energético en establecimientos comerciales o de servicios genera costos económicos similares. Las pérdidas económicas por una caída del sistema eléctrico se asocian con la reducción en la atención de clientes y el deterioro de la mercancía que requiere refrigeración. Estos costos pueden alcanzar valores extremos en algunos segmentos, como, por ejemplo, el sector hospitalario.

En el caso de los usuarios residenciales, el costo está relacionado con la desutilidad que experimentan los usuarios por no poder llevar a cabo las actividades que requieren electricidad: cocinar, ver televisión, leer, lavar la ropa, etc. La desutilidad depende de la duración del corte de suministro. Cuando la interrupción dura pocos minutos, estas actividades se posponen sin causar mayores problemas, mientras que fallas prolongadas pueden imponer sacrificios importantes en la utilidad para los usuarios.

En algunos países las autoridades regulatorias o de planeación del sector han contratado estudios para medir el costo económico de una falla en el suministro eléctrico (precio sombra del racionamiento eléctrico)<sup>31</sup>. En general,

estos estudios aplican métodos de valoración contingente que buscan, a partir de encuestas, determinar cuánto estaría dispuesto a pagar cada tipo de usuario por evitar que le corten la electricidad. Alternativamente, la pregunta se puede plantear en términos de cuál es la compensación que exigirían por estar expuesto a un corte del servicio. Estas encuestas normalmente incluyen variables de control. En el caso de usuarios industriales o comerciales, se pregunta si cuentan con generadores de respaldo y, en caso afirmativo, auscultan por el costo de generación con su propia planta. En el caso de usuarios residenciales, se plantean preguntas de disponibilidad a pagar o ser compensado, en las que el entrevistado responde sí o no a un precio citado ante eventuales cortes de diferente duración. Con los resultados se estiman funciones probabilísticas de aceptación.

Para la evaluación de los beneficios en términos de costos evitados de racionamiento, se debe contar además con una estimación del número y la duración de las fallas en la situación actual y en la situación con proyecto. El diferencial en la energía entregada, valorado al precio sombra del racionamiento de energía, equivale al beneficio económico de la red inteligente en esta dimensión de análisis<sup>32</sup>.

En el Cuadro 3.8 se reportan los resultados de la estimación del precio sombra de la energía eléctrica para cuantificar el costo económico de los racionamientos de energía para cinco países de la región.

## Reducción de las pérdidas técnicas

### ¿Por qué la digitalización reduce las pérdidas técnicas?

Las redes inteligentes con capacidad de monitorear en tiempo real las condiciones del flujo de energía y el comportamiento de los equipos permiten localizar los sectores o elementos de la red con debilidades que generan pérdidas de energía. Las redes inteligentes son más resilientes que las tradicionales porque permiten anticipar los problemas y reaccionar ante eventos como las subidas de voltaje.

Cuando, además de la digitalización de la red, el proyecto contempla la instalación de fuentes de generación descentralizada, las pérdidas técnicas se reducen porque una proporción de la generación se acerca a los puntos de consumo. Las pérdidas técnicas son función directa de la distancia recorrida por la electricidad. A menor recorrido, menores pérdidas técnicas<sup>33</sup>.

31 Este parámetro es esencial para estructurar la evaluación de alternativas en los proyectos de inversión en expansión y refuerzo de las redes de transmisión y distribución de energía eléctrica.

32 En un estudio de IRENA (2015) se presenta una estimación del cálculo de beneficios por reducción de fallas atribuible a la puesta en operación de una red inteligente, con los parámetros descritos a continuación. Reducción en fallas sostenidas (*outages*): 1 %; promedio de VOLL (disponibilidad a ser compensado ante cortes): USD 3/kWh; carga media por usuario: 1 kW; número total de cortes (SAIFI): 10 al año; duración de los cortes (SAIDI): 2 horas cada uno.

33 En el estudio de IRENA (2015), se considera que, si se instalaran fuentes distribuidas de energía reactiva, los inversores fotovoltaicos podrían reducir las pérdidas un 5 %.

Cuadro 3.8 — Estimaciones del sacrificio económico por cortes en el suministro de energía eléctrica en cinco países de América Latina (USD/Mwh)

País, autor, año y documento	Sector	Metodología	Resultado del estudio (USD/MWh)		Tipo de cambio usado en el estudio	Resultado del estudio (USD/MWh) Base septiembre 2020 = 100	
			Límite inferior	Límite superior		Límite inferior	Límite superior
<b>Chile</b> Cisterna, M. E. (2008). <i>Metodología de cálculo de costo de falla intempestivo</i>	Sector residencial	Valoración contingente.	1.500	3.500	No se menciona en el documento, pero el estudio se realizó en 2008.	1.813	4.231
	Sector servicios y servicios públicos	Costeo directo: en la encuesta del sector servicios, se asume que el cliente no sabe qué es el costo de interrupción y se le ofrece una forma de estimarlo a través de las diferencias de utilidad mensual, es decir, restando de las ventas los costos y dividiendo el resultado por las horas de trabajo del local durante el mes. Esta alternativa ofrece una aproximación a las pérdidas que sufre un proveedor de servicios ante interrupciones del suministro.	3.000	7.000		3.627	8.463
	Sector industrial		3.500			4.231	
	Sector minero		1.976			2.389	
<b>Colombia</b> UPME - Mercados Energéticos Consultores (2010). <i>Actualización de los costos de racionamiento de electricidad y gas natural en Colombia</i>	Sector residencial	Métodos indirectos usando cortes no programados.	1.420	2.720	No se menciona en el documento, pero el estudio se realizó en 2005.	1.893	3.625
	Sector industrial		1.930	3.140		2.572	4.185
	Sector comercial		1.590	3.330		2.119	4.438
<b>Colombia</b> UPME - Mercados Energéticos Consultores (2010). <i>Actualización de los costos de racionamiento de electricidad y gas natural en Colombia</i>	Sector residencial	Métodos indirectos usando cortes no programados. Visto del lado de la demanda.	1.870		No se menciona en el documento, pero el estudio se realizó en 2001.	2.749	
	Sector industrial	Encuestas (valuación contingente). Usando cortes no programados. Visto del lado de la demanda.	3.083			4.532	
		Métodos indirectos. Usando cortes no programados. Visto del lado de la demanda.	2.330			3.425	
	Sector comercial	Encuestas (valuación contingente). Usando cortes no programados. Visto del lado de la demanda.	2.907			4.273	
		Métodos indirectos. Usando cortes no programados. Visto del lado de la demanda.	2.150			3.160	
<b>Colombia</b> Econometría Consultores (2015). <i>Desarrollo de una metodología para determinar los costos de racionamiento de los sectores de electricidad y gas natural</i>	Sector residencial A	Valoración contingente. Costo de la interrupción anunciada. Estos cálculos fueron realizados por tipo de día de la semana, rango horario y para periodos normales o de vacaciones escolares. Además, se tuvo en cuenta el estrato y la región.	84	1.687	En el documento no se menciona el periodo de recolección, pero el estudio se publicó en diciembre de 2015. La tasa representativa del mercado en 2015 fue en promedio de COP 2.743,39.	92	1.853
	Sector residencial B	Valoración contingente. Costo de la interrupción no anunciada. Estos cálculos fueron realizados por tipo de día de la semana, rango horario y para periodos normales o de vacaciones escolares. Además, se tuvo en cuenta el estrato y la región.	174	3.506		191	3.851
	Industrias grandes	Valoración contingente. Estos cálculos fueron realizados para periodos de mayores ventas y periodos normales. Además, se tuvo en cuenta la diferenciación regional.	42.650	419.949		46.836	461.167
	Industrias medianas		7.895	77.742		8.670	85.373
	Industrias pequeñas		2.961	29.154		3.251	32.016
	Sector comercial		123	1.214		135	1.333
	Sector servicios		602	5.926		661	6.508
<b>Perú</b> Osinermin (2012). <i>Estimación del costo de racionamiento para el sector eléctrico peruano</i>	Residencial (nivel tarifario BT5 de Lima y provincias)	Valoración contingente: aproxima el valor de los bienes y servicios sin mercado a partir de los efectos en el bienestar que producen los cambios en la cantidad provista del bien. Se basa en preguntas directas del valor de racionamiento a los usuarios mediante encuestas que buscan simular un mercado hipotético para el corte que genera el racionamiento.	777		2,84 promedio de compra y venta (marzo-mayo 2010).	928	
	No residencial MT	Metodología de costos preventivos: el costo de racionamiento está relacionado con el costo que incurren los usuarios por tener un sistema alternativo de generación para enfrentar un corte programado.	1.624			1.939	
	No residencial BT		1.604			1.915	
	Otros libres	En ese sentido, se considera el costo del sistema alternativo de generación para estimar el costo de racionamiento.	255			304	

Notas: En el caso de Colombia, el sector residencial A corresponde a la valoración de un corte de suministro previamente anunciado por la empresa (programado). El sector residencial B hace referencia a la valoración de una interrupción no anunciada. Los valores entre A y B cambian porque en el primer caso, los usuarios pueden tomar medidas que mitiguen el corte del suministro.

## ¿Cómo se estiman los beneficios económicos asociados con la reducción de pérdidas técnicas?

Estas pérdidas constituyen un derroche de recursos económicos. Para cuantificar el beneficio económico, se requiere una estimación del nivel de pérdidas técnicas en las situaciones con y sin proyecto. El flujo de energía ahorrado por el proyecto se valora al precio del kWh a nivel mayorista. De esta forma se está valorando el costo evitado al costo marginal de los recursos involucrados en la generación: diésel, gas natural o agua almacenada<sup>34</sup>.

## Reducción de las pérdidas negras

### ¿Por qué la digitalización facilita el control del recaudo y reduce las pérdidas negras?

La instalación de medidores inteligentes facilita la adopción de mecanismos digitales de prepago del servicio. El usuario puede, vía celular o internet, pagar anticipadamente el consumo. La información del saldo de cada usuario se almacena en una base de datos que interactúa con el medidor. Si el usuario cuenta con un saldo positivo, el medidor permite que fluya la energía; en caso contrario, interrumpe el servicio. Con un medidor tradicional, el corte y reconexión del servicio exige la visita en campo de un operario de la empresa de distribución<sup>35</sup>. Con un AMI, el corte y reconexión se realizan de forma automática y remota, lo que reduce sustancialmente los costos del servicio y da mayor viabilidad al esquema de prepago.

Los problemas de cartera asociados con la falta de pago en ciertos sectores del mercado pueden llegar a comprometer la sostenibilidad financiera de las empresas de distribución. La iliquidez e insolvencia de los operadores de la red se pueden transmitir aguas arriba a la etapa de generación, cuando los

Alternativamente, se podría valorar la reducción de pérdidas utilizando el precio al usuario final como estimación del costo de oportunidad de los recursos. Con esta aproximación metodológica se corre el riesgo de sobreestimar los beneficios del proyecto en la medida que los costos fijos asociados con las redes de transporte y distribución, que están incluidos en la tarifa al usuario final, no se evitan con la reducción en las pérdidas de energía.

distribuidores son incapaces de honrar sus contratos de compra de energía en el mercado mayorista. El desarrollo de un sistema eléctrico financieramente sostenible requiere que la cartera sea sana en todos los segmentos del mercado. La digitalización de la red puede contribuir de manera determinante a alcanzar este objetivo.

### ¿Cómo se valoran los beneficios asociados con una reducción en las pérdidas negras de energía?

Desde el punto de vista económico, se podría considerar que el no pago por el suministro de energía simplemente constituye un subsidio de las empresas a los usuarios y, por lo tanto, una transferencia entre agentes, que no se traduce en el uso de recursos económicos. Esta interpretación desconoce que la captura de recursos públicos para cubrir un mayor volumen de subsidios tiene un costo económico. En efecto, el sistema tributario impone distorsiones en los precios de los bienes y factores que alejan el equilibrio de la actividad económica de su máximo potencial. Los economistas han logrado capturar este efecto a través de un parámetro que mide el costo marginal de los fondos públicos (CMFP)<sup>36</sup>.

34 Por otra parte, la reducción de pérdidas técnicas desplaza a la izquierda la curva agregada de demanda de energía a nivel mayorista y, por lo tanto, permite replantear el plan de expansión en generación. Un efecto de este tipo se trata más adelante, cuando se hace referencia a la generación embebida. Para considerar este efecto, se debe utilizar el costo incremental de largo plazo y no el costo marginal de corto plazo.

35 Los esquemas de prepago de los servicios públicos se utilizan desde hace más de 100 años. En Reino Unido, para ciertos segmentos, el gas natural se suministraba a través de un medidor que solo permitía la circulación del gas si se introducía una moneda. Estos esquemas han mostrado su eficacia para mantener bajos los índices de morosidad, pero son ineficientes porque exigen altos costos de operación.

36 El CMFP se estima en el contexto de un modelo de equilibrio general. En particular se modela cuál es el PIB alcanzado por la economía bajo diferentes configuraciones de tasas impositivas. De esta forma, se puede estimar el sacrificio en términos del valor agregado que genera una unidad monetaria adicional de recaudo cuando se simula un aumento en la tarifa de determinado impuesto.

Cuadro 3.9 — Costo marginal de los fondos públicos (CMPF)

País	Tipo	CMPF	Año de actualización
Argentina	Impuesto sobre el volumen de ventas	0,67 - 1,50	2010
	Impuesto al trabajo		
	Impuesto al capital		
	IVA		
	Impuesto al ingreso		
Chile	Bienes de consumo gravados (nacionales)	1,07	2012
	Importaciones	1,08	
	Exportaciones	1,08	
	Trabajo	1,13	
	Capital formal	1,18	
	Todos	1,13	
	Colombia	Impuesto sobre la renta persona jurídica	
Impuesto sobre la renta persona natural		1,20	
Parafiscal Sena e ICBF		1,12	
Cajas de compensación		1,14	
IVA		1,24	
Aranceles		1,22	
Paraguay	Impuesto a las actividades	1,01	2016
	Impuestos selectivos al consumo	1,03	
	Aranceles	1,07	
	IVA	1,06	
	Todos	1,05	
Perú	No se menciona	1,14 - 1,25	2006
Australia	Trabajo	1,19 - 1,24	Campbell-Bond (1997)
	Trabajo	1,28 - 1,55	Findlay-Jones (1982)
	Capital	1,21 - 1,48	Diewert-Lawrence (1998)
	Capital	1,15 - 1,51	Benge (1999)
Canadá	Productos básicos ( <i>commodity</i> )	1,25	Campbell (1975)
	Trabajo	1,38	Dahlby (1994)
	Trabajo	1,39 - 1,53	Fortin-Lacroix (1994)
Estados Unidos	Todos los impuestos	1,17 - 1,33	Ballard et al (1985)
	Todos los impuestos	1,47	Jorgenson-Yun (1990)
	Trabajo	1,21 - 1,24	Stuart (1984)
	Trabajo	1,32 - 1,47	Browning (1987)
	Trabajo	1,08 - 1,14	Ahmed-Croushore (1994)
Nueva Zelanda	Trabajo	1,18	Diewert-Lawrence (1994)
Suecia	Todos los impuestos	1,69 - 2,29	Hansson-Stuart (1985)
Bangladesh	Ventas	0,95 - 1,07	Devarajan et al (2001)
	Importaciones	1,17 - 2,18	
Camerún	Ventas	0,48 - 0,96	
	Importaciones	1,05 - 1,37	
China	Ventas	2,31	Laffont et al (1997)
India	Consumo	1,66 - 2,15	Ahmad and Stern (1987)
	Ventas	1,59 - 2,12	
	Importaciones	1,54 - 2,17	
Indonesia	Ventas	0,97 - 1,11	Devarajan et al. (2001)
	Importaciones	0,99 - 1,18	

Fuentes: Para Argentina, Chisari y Cicowicz (2010); para Chile, Rodríguez Ylasaca (2012); para Colombia, Cañas Rengifo (2015); para Paraguay, Galeano (2016); para Perú, MEF (2006); resto de países, autores mencionados en la columna de actualización citados por Strand (2009).

Siguiendo esta aproximación metodológica, los beneficios asociados con la disminución de la cartera morosa en las empresas distribuidoras, la digitalización y la facilitación de esquemas de prepago se estimaría como el diferencial en el recaudo entre las situaciones con y sin proyecto, valorada al costo marginal de los fondos públicos.

## Reducción del costo operativo (OPEX)

### ¿Por qué la digitalización reduce los costos de operación en las etapas de facturación y recaudo?

Los AMI permiten leer los consumos de manera remota y automática, así como desconectar y reconectar el servicio a distancia. Con el despliegue de la medición inteligente, las empresas de distribución de energía evitan una fracción importante de los costos del área comercial, porque pueden reducir la planta de personal o la contratación con terceros para las actividades de lectura, cortes y reconexiones. Los costos de lectura de los medidores son elevados, especialmente en áreas urbanas poco densas o rurales, debido al tiempo requerido y los costos de desplazamiento del personal a cargo de esta actividad. La digitalización de las lecturas, a su vez, facilita los procesos de facturación y reduce los errores asociados con este proceso.

## Reducción en la necesidad de compra de energía reactiva para el control automático de la generación

### ¿Por qué las redes inteligentes pueden reducir las necesidades de energía reactiva?

De acuerdo con XM (2017), el operador del mercado eléctrico en Colombia, el control automático de generación (CAG) hace referencia al “sistema de control que permite ajustar de forma automática la potencia de salida de múltiples recursos de generación para llevar la frecuencia y los intercambios a su valor de referencia y las plantas de generación a su valor económico programado, garantizando el balance continuo entre la carga y la generación”. Algunos equipos de las redes inteligentes, como los convertidores en fuentes no

Bajo el enfoque de la empresa, el beneficio es mayor y se estima como la totalidad de la reducción de la cartera en mora atribuible al proyecto, valorada al precio por kWh promedio para los usuarios finales en el segmento de mercado donde se aplicó la medida.

### ¿Cómo se valoran los beneficios asociados con la reducción de los gastos de administración y operación como resultado de la medición inteligente?

Los beneficios económicos se miden como la reducción en los costos del área comercial de las empresas inducidos por el proyecto de digitalización de la red. El ahorro se puede afectar por el precio sombra o precio de eficiencia de la mano de obra, para considerar que el costo de oportunidad del trabajo puede ser inferior al salario, particularmente en economías caracterizadas por niveles elevados de desempleo persistente.

A los beneficios estimados se debe restar el costo por el pago del espectro u otro medio que permita la conectividad de la red de medidores. En general, este costo es muy bajo con relación al beneficio en áreas densas y se eleva considerablemente en áreas rurales o zonas urbanas de baja densidad. En la etapa de estructuración de los proyectos que involucren el despliegue de medición inteligente, se debe definir el alcance geográfico del proyecto, de forma que la relación entre el beneficio y el costo marginal sea positiva para todos los usuarios.

convencionales, tienen la capacidad de aportar energía reactiva al sistema, con lo cual se reducen las compras del distribuidor de este tipo de energía. Este objetivo también se cumple con nueva capacidad de almacenamiento en la red, que puede provenir de baterías instaladas por los usuarios para mejorar el balance entre autogeneración y consumo o de los vehículos conectados a la red en fase de carga<sup>37</sup>.

<sup>37</sup> Ver IRENA (2015). La capacidad de superar eventos de frecuencia y voltaje puede reducir las necesidades de CAG hasta en un 5 %. Los cortes de potencia de alta frecuencia en eólica y fotovoltaica y la inercia de las turbinas pueden reducir el costo de CAG otro 5 %. Este beneficio se inicia en 0 y se escala hasta un 10 % en la vida del proyecto.

## ¿Cómo se valoran los beneficios asociados con la reducción de requerimientos de CAG?

Para asegurar que el sistema cuenta con la capacidad de ajustar la oferta de energía a la demanda en cualquier momento es necesario designar algunos recursos de generación para que permanezcan en reserva. Cuando se presenta un aumento súbito en la demanda o la salida de alguna de las plantas que está generando, automáticamente se acude a los recursos de reserva para balancear la oferta y la demanda. De esta forma, el valor económico del CAG iguala al costo de oportunidad de mantener en reserva recursos que podrían estar generando energía en forma permanente. Cuando el precio de la energía se establece libremente en el mercado, el precio del CAG se desprende de un proceso de

subasta, en el que las plantas con la flexibilidad necesaria para ofrecer este respaldo ofertan un precio por marginarse del despacho ordinario. El CAG se asigna por mérito, hasta suplir las necesidades técnicas establecidas por el operador del sistema. En sistemas donde el precio se define por costos, este parámetro también se forma administrativamente en función del costo de las plantas de reserva.

Para estimar el beneficio, es necesario contar con una estimación de la reducción en las compras del CAG inducidas por el despliegue de la red inteligente. Es importante considerar que la intermitencia en la generación de fuentes no convencionales eleva los requerimientos de CAG. El ahorro en compras de energía reactiva se valora al precio del CAG establecido por el sistema.

## Reducción del precio de bolsa

### ¿Por qué la digitalización de las redes eléctricas y la promoción de la generación descentralizada pueden presionar a la baja el precio de la energía eléctrica?

En mercados donde el precio mayorista de la energía se determina administrativamente en función de los costos de generación, la entrada de fuentes renovables embebidas en la red<sup>38</sup> puede desplazar recursos de despacho centralizado de costos elevados. La nueva composición de la matriz de generación se traduce en una reducción del costo promedio y, en consecuencia, del precio de la energía eléctrica. En sistemas donde las fuerzas del mercado determinan libremente el precio, la entrada de recursos descentralizados se puede modelar como un desplazamiento a la derecha de la función de la oferta, lo que se traduce en un precio de equilibrio menor<sup>39</sup>.

En la evaluación de los proyectos de digitalización, es importante determinar si la entrada de generación con fuentes no convencionales se atribuye al proyecto o se trata de un proceso que se habría dado en el sistema independientemente de la digitalización. En el primer caso es correcto incluir en la evaluación económica el beneficio asociado con el efecto de las fuentes renovables sobre el precio mayorista de la energía. También se debe considerar el costo de estas fuentes. Es importante mencionar que la intermitencia e irregularidad en los aportes de energía de estas fuentes imponen un reto al operador que, entre otras cosas, y como se mencionó, requiere una mayor capacidad de reserva para regular el sistema. En

este sentido, las redes inteligentes facilitan la transición hacia fuentes amigables con el ambiente.

El efecto de la digitalización sobre los precios de la energía también puede provenir del cambio en el perfil horario del consumo agregado de energía eléctrica. En efecto, los medidores inteligentes pueden determinar los consumos en intervalos de tiempo reducidos, como, por ejemplo, cada hora. Si se adecúa la plataforma transaccional del mercado para establecer los equilibrios de precios en intervalos menores de tiempo y se permite que esta señal se transmita a los usuarios, los medidores inteligentes pueden tener un efecto muy positivo sobre el perfil de la demanda y, en consecuencia, sobre los precios mayoristas. Estos equipos tienen la capacidad de consultar permanentemente el precio de la energía en el mercado mayorista y tomar decisiones para aplazar el consumo de energía de electrodomésticos en momentos de precios elevados e iniciar las rutinas en horas de menor demanda, cuanto el precio en el mercado es bajo. Esta función, asociada con el internet de las cosas, se aplica para actividades como lavar la ropa o la vajilla, manejar la calefacción o el aire acondicionado o programar la carga de los vehículos eléctricos. La función es útil para usuarios residenciales, pero también, en edificios con alta afluencia de público.

La digitalización de las redes de energía, desde esta perspectiva, introduce eficiencia en el mercado. Actualmente, los operadores del mercado estiman los precios mayoristas considerando una función de demanda perfectamente

38 Generadores con fuentes no convencionales (eólica, solar).

39 Alternativamente, el operador del sistema puede simular el efecto como una reducción de la demanda (desplazamiento de la curva a la izquierda), con una consecuente reducción en el precio de mercado.

inelástica, que no reacciona ante los cambios de precio. Las redes inteligentes permiten que la demanda sea reactiva a la señal de precios, lo que redundaría en eficiencia y equilibrios del mercado con precios menores. Cuando se aplanan el perfil de consumo, se reduce la demanda en las horas de demanda pico, en las cuales el sistema debe recurrir a plantas de generación caracterizadas por altos costos marginales. Las redes inteligentes, el internet de las cosas y una resolución de precios en intervalos más cortos de tiempo presionan a la baja el precio de la energía a nivel mayorista, lo que redundaría en precios más bajos para el usuario final.

### **¿Cómo se valoran los beneficios asociados con la reducción del precio mayorista de la energía eléctrica?**

La valoración de los beneficios de la digitalización de las redes de energía eléctrica por menores precios mayoristas asociados con la suavización en los patrones horarios de consumo y por la incorporación de generación descentralizada es compleja. Esto se debe al gran número de factores que determinan el precio de la energía en el mercado. Idealmente, se deben simular, en los modelos con que cuente el operador, los equilibrios de precios en la situación con y sin proyecto. La línea

## **Reducción de los costos de congestión y restricciones del transporte**

### **¿Cómo incide la digitalización de las redes eléctricas en la reducción de los costos de transmisión?**

La generación de electricidad con fuentes eólica y solar embebida en la red reduce la distancia entre los puntos de producción y los de consumo. En consecuencia, se reduce la cantidad de kWh/km transportados en la red y con ello el factor uso/capacidad del sistema de transmisión. Este efecto puede ser despreciable en términos económicos para redes que cuentan con holgura en su dimensionamiento, pero puede adquirir magnitudes importantes si la generación descentralizada se localiza en sectores del sistema que operan en condiciones de congestión.

### **¿Cómo se estiman los beneficios asociados con la reducción en los costos del transporte de la energía eléctrica?**

En sistemas nodales, el precio de la energía difiere en cada localidad en función de las restricciones particulares de la red de transporte. El diferencial de precios entre una localidad y

de base se simula con los recursos de generación y el perfil de la demanda observado. En la situación con proyecto, se incluyen en el modelo las nuevas fuentes renovables, con las estimaciones de generación para un período determinado (año) en función de los modelos estadísticos de radiación solar y viento, y una curva más plana de consumo horario de acuerdo con las estimaciones de penetración de la medición inteligente y su conexión con el IdC<sup>40</sup>. La diferencia en los precios de equilibrio que arrojen las simulaciones con y sin proyecto, agregada por la energía entregada por el sistema,  $(P_0 - P_1) \cdot Q$ , equivale al beneficio del proyecto.

En ausencia de modelo, se puede analizar el impacto de la oferta en los equilibrios históricos. Se trata de determinar qué recursos, con qué costos e intensidad de uso se desplazan por la entrada de las fuentes no convencionales y por el aplanamiento del perfil horario del consumo. Para ello se debe construir la función de costo marginal y reemplazar las plantas menos eficientes con los recursos cuya entrada es estimulada por el proyecto. En estos ejercicios se deben considerar eventuales costos incrementales por mayores exigencias en energía de respaldo.

otra refleja, precisamente, el valor económico de la congestión en la red. Para estimar el beneficio en este tipo de sistemas, se deben simular los equilibrios con y sin proyecto en cada nodo, considerando las nuevas fuentes de generación. La reducción en el precio de cada nodo, agregado por la energía en el mismo constituye una estimación del beneficio obtenido por esta causa.

En mercados uninodales, donde el precio mayorista es el mismo para todo el sistema, se calculan los costos de las restricciones de la red de transmisión como la diferencia entre los costos óptimos del despacho (con los recursos de costo mínimo) y el costo del despacho real, que considera las restricciones de la red para distribuir geográficamente toda la energía del despacho óptimo. En efecto, para atender las restricciones de transporte es necesario apagar las plantas de menor costo y despachar plantas que, aunque tienen mayores costos de generación, están localizadas en el área congestionada. Una simulación de los costos de las restricciones en la situación con y sin proyecto representa una buena estimación de los beneficios del proyecto de

40 Alternativamente, es posible simular el equilibrio del mercado asumiendo alguna elasticidad de la función de demanda en la determinación de los equilibrios horarios de precios.

digitalización por reducciones en los costos de transmisión. En la práctica, este esfuerzo solo amerita si la localización de la generación promovida por el proyecto de digitalización se

encuentra en un sector congestionado de la red de transporte, donde el uso es cercano a su capacidad.

## Ahorros percibidos por los usuarios en sus facturas

### ¿Cómo incide la digitalización de la red eléctrica en la reducción de las facturas que enfrentan los usuarios?

Como se explicó, la posibilidad de desplazar el consumo a horas de bajo precio reduce el precio de la energía en el mercado mayorista porque disminuye la exigencia de acudir a recursos costosos en las horas de mayor demanda. La caída en el precio, por su parte, permite capturar el efecto de la digitalización sobre el mercado en su conjunto.

Es conveniente, además, analizar el impacto desde una perspectiva microeconómica para evaluar el efecto sobre los presupuestos de los usuarios. Si el esquema comercial permite liquidar los consumos con una periodicidad horaria y los usuarios cuentan con un medidor inteligente y el IdC, es posible simular la reducción en las facturas por el desplazamiento de los consumos a los horarios de precios bajos. La estimación del ahorro a nivel del usuario permite entender la fuerza del incentivo para el cambio de hábitos de los consumidores y calcular la relación micro entre el costo de los equipos y el ahorro en la factura para determinar el período de retorno de la inversión (*pay back*) en cada domicilio. El ahorro va a ser proporcional a la participación de los equipos cuyo consumo sea postergable dentro del consumo total del hogar. El ahorro se incrementa considerablemente si el usuario destina parte de la energía a cargar su vehículo eléctrico. Desde esta perspectiva, la digitalización estimula la demanda por movilidad eléctrica (precios menores en horarios de bajo consumo) y esta, a su vez, incentiva la digitalización (más rápida amortización del costo de los equipos digitales). Esta estimación, sin embargo, no se debe sumar al efecto a nivel de mercado, porque se estaría incurriendo en una doble contabilización del mismo beneficio económico.

A nivel micro, también se puede estimar la reducción esperada en la factura de electricidad que disfrutaría un usuario que instale un equipo de generación descentralizada, como, por ejemplo, un panel solar. La generación propia permite reducir la demanda de la red, con lo cual también bajará el monto promedio de la factura mensual del usuario. La relación entre el valor presente de este ahorro y el costo de los equipos ofrece,

nuevamente, un indicador de la viabilidad de considerar la autogeneración a un nivel microeconómico.

### ¿Cómo se mide el efecto micro de la reducción en facturas inducida por la digitalización?

Un análisis para determinar el potencial desplazamiento del consumo se debe basar en encuestas de hogares dirigidas específicamente a descomponer el consumo de energía eléctrica observado entre los diferentes usos al interior del hogar o el negocio. Con las frecuencias y duración del uso de los equipos y su capacidad (kW), es posible estimar la energía potencialmente desplazada. Por otra parte, un análisis del precio de cierre en bolsa en cada hora o los costos medios de generación horaria en los mercados administrados arroja una estimación entre el precio promedio, que es la señal que actualmente recibe el usuario, y el precio en horas de baja demanda, que es el que correspondería a los consumos desplazados. De esta forma, es posible construir un indicador del incentivo económico por migrar hacia la medición inteligente y el IdC.

En principio, el impacto de la generación propia sobre la factura es de fácil estimación y basta con descontar de la factura actual el consumo alimentado con su propia generación. En la práctica, el ejercicio es más complejo. En primer lugar, se requiere una estimación de la generación en función de los índices de radiación por m<sup>2</sup> en el área, es decir, la eficiencia del panel. Es necesario, además, analizar el patrón horario de consumo para determinar qué porcentaje de la demanda puede ser abastecida con autogeneración para aquellas instalaciones que no cuentan con capacidad de almacenamiento. Finalmente, es necesario conocer el mecanismo regulatorio que rige sobre el precio de venta de los excedentes del usuario cuando su generación excede el consumo. Como se discute más adelante, existen varias alternativas regulatorias para fijar este precio. Se insiste en que este cálculo es útil, incluso necesario, para evaluar la rentabilidad y el período de retorno de la generación limpia desde la perspectiva del usuario, pero no se debe sumar a los beneficios agregados porque se trataría de una doble contabilización del mismo beneficio<sup>41</sup>.

41 Ver Sierra Delgado et al. (2020).



## Desplazamiento de las inversiones en generación

### ¿Por qué la digitalización de las redes eléctricas puede aplazar las inversiones en generación?

El plan de expansión de los sistemas eléctricos se estructura sobre un balance entre la capacidad y la demanda pronosticada para el futuro. Como los proyectos de generación tienen un ciclo de maduración, es necesario tomar decisiones de inversión actualmente para asegurar los balances en un horizonte de mediano plazo (el horizonte depende de la tecnología de 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 adicionales en el parque de generación. Desde esta perspectiva, cada MWH generado por energías limpias evitaría un MWH con plantas convencionales. Es importante recordar que las fuentes limpias son intermitentes, con lo cual es probable que se requiera, en algún grado, aumentar la capacidad de reserva y el CAG del sistema para asegurar el suministro en eventos de baja generación con las fuentes renovables.

La segunda vía por la cual la digitalización puede desplazar inversiones en generación es el aplanamiento del perfil horario del consumo que operaría con redes digitales y señales

## Desplazamiento de las inversiones en distribución y transporte y reducción de los costos de mantenimiento

### ¿Por qué la digitalización permite aplazar las inversiones y los gastos de operación y mantenimiento en las redes de transmisión y distribución eléctrica?

La generación embebida, como se ha mencionado, acorta las distancias entre las fuentes de producción y los puntos de consumo y, por lo tanto, reduce los flujos de energía eléctrica en las redes de distribución y transporte. La planeación de las redes, por su parte, busca entregar la capacidad necesaria para que la energía fluya sin restricciones entre los nodos de generación y los de consumo bajo un despacho ideal. Por lo anterior, cuando se digitaliza la red y se introduce generación

horarias de precio (Guang et al., 2019)<sup>42</sup>. La capacidad de generación se dimensiona con base en la demanda máxima. El parque de generación debe tener la capacidad de atender la demanda bajo la máxima exigencia en horas de alto consumo. Es precisamente por esta razón que, si se logra aplanar el perfil horario de la demanda, se reduce la presión para expandir el sistema.

### ¿Cómo se valora el desplazamiento en las inversiones de generación?

El desplazamiento de las inversiones en generación reduce el costo incremental de la energía eléctrica de largo plazo. Este parámetro se estima como la relación entre el incremento en el costo total del servicio y el incremento en la capacidad de generación inducida por el proyecto óptimo en el plan de expansión. Medido de esta forma, la digitalización de la red impacta no solo en el costo marginal (y el precio) en el corto plazo, sino que también tiene un efecto positivo y persistente en un horizonte de largo plazo. En el cálculo de este beneficio no se debe ignorar el posible aumento de la capacidad de reserva requerida por el sistema para asegurar los balances y la estabilidad ante un aumento en la participación de recursos intermitentes que no se despachan de forma centralizada.

embebida, es posible que sea necesario revisar los planes de expansión de la red eléctrica, desplazando al futuro inversiones que se consideraban prioritarias bajo la configuración geográfica del parque de generación antes del proyecto<sup>43</sup>.

Por otra parte, las redes inteligentes permiten monitorear remotamente las condiciones de los flujos de energía y el estado de los elementos de la red, lo que resulta en una red más resiliente. El mayor conocimiento del estado de la red se traduce en rutinas de mantenimiento preventivo mejor focalizadas y en ahorros en el mantenimiento de la red en el futuro (Alaqael y Suryanarayanan, 2019)<sup>44</sup>.

42 En el estudio de Guang et al. se estima una elasticidad precio de la demanda de energía entre -0,647 y -0,361. Muestra, además, que las tarifas sensibles al horario producen mejores resultados en términos económicos.

43 Por ejemplo, en el estudio de IRENA (2015) se considera el siguiente beneficio: el despliegue de inversores fotovoltaicos con control de volt-*VAR* evita la compra de bancos de capacitores (condensadores) con conmutación mecánica (*switched capacitors banks*) que constituyen la fuente convencional de control del voltaje.

44 En este estudio estiman que la migración hacia una red inteligente en Arabia Saudita reduce los costos de operación en un 8 %.

## **¿Cómo se valora el beneficio económico por el desplazamiento de las inversiones en distribución y transmisión y la reducción de gastos de operación y mantenimiento inducidos por la digitalización de la red?**

El beneficio asociado con el desplazamiento al futuro de las inversiones para expansión y el refuerzo de los sistemas de transmisión y distribución se estima con una metodología similar a la descrita para el caso de la generación. Se trata de calcular, con la información disponible de planeación del sistema, el costo incremental de largo plazo de los servicios de transporte y distribución en las situaciones con y sin proyecto.

## **Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)**

### **¿Por qué la digitalización de las redes eléctricas contribuye a reducir la emisión de GEI?**

Como se ha mencionado, las redes inteligentes de energía facilitan la entrada al sistema de recursos de generación descentralizados porque cuentan con equipos que permiten balancear la corriente proveniente de fuentes renovables, como la energía eólica y solar. Estas se caracterizan por patrones estocásticos de generación (no despachados centralmente) y un nivel elevado de intermitencia (IRENA, 2015). La entrada de estas fuentes desplaza otras, algunas de ellas basadas en combustibles fósiles, como el diésel, el carbón o el gas natural, que emiten CO<sub>2</sub> a la atmósfera, uno de los principales gases con efecto invernadero. En la evaluación del proyecto de digitalización de la red es importante considerar si la entrada de las energías limpias se debe a la realización del proyecto o si, por el contrario, estos recursos se habrían incorporado en el sistema aún con la red eléctrica tradicional.

La diferencia en este parámetro constituye el beneficio económico de mediano y largo plazo.

En cuanto al beneficio relacionado con la reducción de los costos de operación y mantenimiento de las redes de transmisión y distribución, requiere de una estimación por parte del estructurador del proyecto en términos de los requerimientos de mantenimiento de estas redes en las condiciones actuales (reporte de la empresa) y los estimados con proyectos. El flujo de ahorros por este concepto puede corregirse por el precio sombra de la mano de obra, calificada y no calificada, según corresponda, en aquellos países donde se han estimado estos parámetros.

### **¿Cómo se cuantifican los beneficios por GEI inducidos por el despliegue de redes inteligentes?**

A partir de la matriz de energía eléctrica de cada país y la generación esperada de fuentes no convencionales inducida por el proyecto, se estima la emisión de CO<sub>2</sub> evitada<sup>45</sup>. El beneficio económico se puede obtener multiplicando el volumen de las emisiones evitadas (t CO<sub>2</sub>/año) por el costo económico asociado con la externalidad de emisiones de GEI (USD/t CO<sub>2</sub>). Este último parámetro se puede adoptar de los precios que fijó el mercado por la emisión de carbono a la atmósfera (Protocolo de Kioto) o por la valoración adoptada por cada país en los compromisos adquiridos en el marco del Acuerdo de París de 2015 (COP21<sup>46</sup>).

Es importante mencionar que, si se imputan al proyecto de digitalización los beneficios económicos y ambientales asociados a un aumento en la generación con fuentes limpias de energía, también se deben incluir en la evaluación los costos de capital y los de operación y mantenimiento de estas plantas.

## **Tipologías de proyectos**

De los apartados anteriores se desprende que la digitalización de las redes eléctricas abarca un amplio espectro de equipos, funciones y beneficios que varían según la estructuración

específica de cada proyecto. El modelo para la evaluación beneficio-costos, que se presenta en el Capítulo 6, se debe formular para su aplicación en proyectos que efectivamente se

<sup>45</sup> Lo anterior requiere conocer el combustible de cada planta, su eficiencia energética (*heat rate*) y los niveles anuales de generación. Con estos parámetros y las emisiones estándar de CO<sub>2</sub> en la combustión de cada producto energético, es posible estimar los niveles de emisión.

<sup>46</sup> Conferencia 21 de las partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)

encuentren en la cartera de CAF y contengan un componente significativo de digitalización. En principio se plantea estructurar un modelo que se adecúe a las clases de proyectos previstos, escogidos a partir de una lista que incluye:

- Instalación de medidores inteligentes, que incorporarán, para el caso de los AMR, la función de medición remota y, en el caso de los AMI, esa misma función y la implementación de la tarificación dinámica por franjas horarias.
- Proyectos para el despliegue de recursos de generación de energía eléctrica en las redes de distribución (DER), los cuales podrían incluir el uso tanto de medidores para la lectura del consumo de energía eléctrica como de

inversores inteligentes que permitan la transformación de corriente directa en alterna.

- Automatización de la red de distribución (ADA), consistente en la automatización de los elementos de control de las redes de transmisión y distribución.
- Implementación de redes e infraestructuras de tecnologías de la información (TI) para la gestión y el control de las comunicaciones y el flujo de la información generada por los elementos de control automatizados de la red y los medidores inteligentes.
- Aplicación de algoritmos de inteligencia artificial para la predicción y optimización del consumo de energía eléctrica.

## Incentivos y barreras para la digitalización del sector de la energía eléctrica

La estructura institucional del sector eléctrico varía considerablemente entre los países de la región. En un extremo prevalecen operadores integrados verticalmente, desde la generación hasta la distribución a los domicilios. En el otro extremo se encuentran mercados desintegrados verticalmente, con libre entrada en las actividades, donde es posible la competencia (generación y comercialización), y con una estricta regulación de la expansión y la tarifa en los segmentos monopólicos (transmisión y distribución). Independientemente del grado de apertura de los mercados, el suministro del servicio de energía eléctrica requiere de un esquema de despacho centralizado para asegurar que en cada instante la energía generada iguale la energía demandada<sup>47</sup>. Bajo esta configuración, la evolución del sector eléctrico depende, en buena medida, de las reformas regulatorias que promuevan o inhiban la introducción de cambios técnicos. La digitalización y la expansión de fuentes de generación descentralizada de menor escala embebida en la red de distribución dependen en gran medida de la estructuración del mercado y de los incentivos regulatorios y económicos que contemple.

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 solar y el viento, sin considerar

el nivel de 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 recursos de energía distribuida (DER) tengan la capacidad para recibirla. 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 opciones para regular su entrada. En general, se obliga al operador de 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 autorizaciones, si la red tiene la capacidad suficiente para recibir la energía proveniente de los DER. De esta forma los usuarios pueden 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.

<sup>47</sup> El almacenamiento de energía eléctrica a gran escala es costoso y, por lo tanto, es necesario contar con un ente centralizado, con autoridad para exigir un aumento de los niveles de generación cuando la demanda crece y reducirlos cuando la demanda baja.

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. Para el operador de la red, la introducción de DER 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 distribución<sup>48</sup>. 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:

- Contratos a precio fijo. El operador de red reconoce un precio fijo por kWh recibido del usuario, independientemente de las condiciones del mercado. Este esquema, se asemeja a los contratos bilaterales de compra de energía por grandes usuarios, que buscan mitigar el riesgo asociado con las variaciones de precio en la bolsa de la energía.
- Medición neta (*net metering*). Se liquida al usuario con base en la energía calculada como la variación en las lecturas del medidor<sup>49</sup>. De manera implícita, con este esquema se están reconociendo al usuario los excedentes al precio para el consumidor final. Este esquema incentiva la instalación de DER, pero se trata de una sobrerremuneración porque, como se mencionó, la tarifa al usuario final cubre los costos fijos de transmisión y distribución asumidos por el distribuidor y no por el usuario.
- Facturación neta (*net billing*). En este caso el balance no se hace sobre la energía, sino directamente sobre la liquidación de consumos de acuerdo con los precios en el mercado mayorista a la hora en que se inyecten los excedentes a la red.

- Precio de bolsa. Bajo esta metodología los excedentes se pagan al precio mayorista de acuerdo con su nivel horario. Este precio no incluye cargos de distribución y transporte y por lo tanto corrige la sobrestimación del esquema de medición neta.
- No pago. En algunos países el distribuidor no reconoce ningún pago por la energía inyectada en la red. Este esquema protege al operador de la red de eventuales pérdidas con la energía inyectada en los esquemas que sobrerremuneran los excedentes, pero puede constituir un freno para la expansión de la generación embebida en la red.

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 los segmentos de población de bajos ingresos, sin capacidad para asumir el gasto. Por otra parte, con el despliegue de los AMI, la empresa de distribución 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 la empresa asumir los costos de los AMI sin un ajuste correspondiente en la tarifa podría ser expropiatorio y comprometer 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 la señal de precios bajos del mercado en horas nocturnas de baja demanda, cuando su vehículo está cargando. Con 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.

Finalmente, es importante tener presente que algunos de los beneficios de las redes eléctricas están constituidos por la reducción de externalidades, como la contaminación y la 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.

48 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.

49 Los medidores inteligentes son bidireccionales y pueden medir la energía que fluye de la red al usuario y la que fluye del DER del usuario a la red. El neto se estima como la energía consumida (kWh) menos la energía generada (kWh).

# Indicadores para la digitalización en el sector de la energía eléctrica

Los indicadores para medir la evolución de la digitalización de las infraestructuras en el sector de la energía en los países de la región se presentan en el Cuadro 3.10.

Cuadro 3.10 — Indicadores para el seguimiento de la digitalización de la infraestructura del sector eléctrico

Indicador	Forma de cálculo
Penetración de la medición inteligente	Medidores AMI o medidores totales
Penetración de la generación con recursos descentralizados	Número de DER conectados a la red Generación promedio diaria con DER (kWh/año) Participación de la generación descentralizada en la generación total (porcentaje)
Penetración de vehículos eléctricos	Número de vehículos eléctricos registrados Participación de los vehículos eléctricos en el parque total (porcentaje)
Redes inteligentes	Extensión de redes inteligentes (km de cobertura) Participación de las redes inteligentes en la red eléctrica total (porcentaje) Participación de la energía gestionada en las redes inteligentes respecto a la energía total (porcentaje)
Energías limpias	Participación de los recursos renovables en la generación eléctrica (porcentaje: kWh/año con energía solar, eólica, hídrica respecto a kWh totales)
Cambio en la participación de energías limpias	Variación anual del indicador anterior

# Digitalización de la infraestructura en el sector de la movilidad

## Experiencias internacionales en materia de digitalización en el sector de la movilidad

En este capítulo se analizan experiencias internacionales exitosas de digitalización en el sector de la movilidad en Singapur, Finlandia, Suecia, Chile, Argentina y Brasil. Los casos presentados comprenden proyectos dirigidos a desincentivar el uso de vehículos particulares, optimizar la provisión de los servicios de

transporte público y facilitar a los ciudadanos su uso mediante la digitalización. Las iniciativas han resultado en mejoras en el uso de los recursos del sector y la gestión del tráfico, reducciones de las emisiones de contaminantes al medio ambiente e incrementos en los niveles de confort y seguridad para los usuarios.

### Digitalización del sistema de transporte público de Singapur

#### ¿Cuál es el problema?

Singapur es un país insular, con una extensión de 721 km<sup>2</sup> y una población en 2018 de 5,6 millones de habitantes. A pesar de tener un espacio físico limitado y alta densidad poblacional, el sistema de transporte de Singapur es el sexto mejor del mundo, según la clasificación de sistemas de transporte inteligente desarrollado por la Universidad Nacional de Singapur, que compara 26 ciudades con un nivel de infraestructura alto. En la categoría de transporte público, Singapur ocupa el segundo lugar, luego de Londres (Debnath et al., 2014).

La economía de Singapur está considerada como una de las más competitivas a nivel mundial y la actividad existente en la ciudad ocasiona una gran cantidad de desplazamientos a sus habitantes. Se estima que en 2008 se realizaron 9,86 millones de viajes por día, de los cuales el 56 % fueron atendidos por el sistema de transporte público (Haque et al., 2013).

La alta demanda de desplazamientos, sumada a las restricciones de crecimiento de la red vial debido a la limitada superficie del país, supone grandes retos para el desarrollo de

un sistema de transporte eficiente y de calidad, por lo que el estudio de este caso resulta de gran interés.

#### ¿Cómo lo resolvieron?

Para atender de forma eficiente las necesidades de movilidad de los ciudadanos, el país ha adoptado diversas políticas de largo plazo, tanto desde la perspectiva de la demanda como de la oferta. Con ellas ha buscado desarrollar un sistema de transporte moderno basado en tres pilares: sostenibilidad, seguridad e inteligencia.

Según Haque et al. (2013), un sistema de transporte moderno basado en estos tres pilares se define como “un sistema que promueve el bienestar económico y social de forma segura y eficiente sin afectar el medio ambiente y sin agotar los recursos naturales”. El tercer pilar del sistema, la inteligencia, se logra a través del uso intensivo de la tecnología, mediante la cual se apalancan las medidas de sostenibilidad y seguridad, generando una mayor eficiencia y calidad del sistema de transporte. Los componentes de inteligencia involucran sistemas de control, monitoreo y vigilancia, gestión de la información y recaudo, como se explica a continuación.

**1 Sistemas de control.** Se utilizan para gestionar el flujo del tráfico y la seguridad en vías e intersecciones. En el Cuadro 4.1 se describen las principales tecnologías implementadas.

Cuadro 4.1 — Tecnologías utilizadas en los sistemas de control

Tecnología	Impacto
<b>Semáforos inteligentes (GLIDE).</b> Detección automática de vehículos y manual de peatones, que ajusta la duración de los estados del semáforo.	Mejora el flujo vehicular al reducir las paradas y el tiempo de espera. Aumenta la seguridad de peatones y conductores.
<b>Señalización de prioridad para buses.</b> Detección automática de buses aproximándose a una intersección y ajuste de la duración de la luz verde para darle prioridad.	Disminuye los tiempos de desplazamiento y la variabilidad de los tiempos de espera de los buses.
<b>Sistema de detección de adultos mayores</b> en los cruces de las intersecciones a través de la lectura de una tarjeta inteligente.	Incrementa la seguridad de los adultos mayores.
<b>Luces inteligentes</b> instaladas en el suelo, que parpadean cuando se activa el paso peatonal para alertar a los conductores, especialmente por la noche.	Incrementa la seguridad de los peatones.
<b>Señalización dinámica de los límites de velocidad</b> según las condiciones de tráfico.	Mejora el flujo vehicular y la seguridad vial.

Fuente: Elaborado a partir de Haque et al. (2013).

**2 Sistemas de monitoreo y vigilancia.** Tienen como objetivo asegurar que los conductores obedezcan las reglas de tránsito y la regulación. En el Cuadro 4.2 se describen las principales tecnologías implementadas.

Cuadro 4.2 — Tecnologías utilizadas en los sistemas de monitoreo y vigilancia

Tecnología	Impacto
<b>Cámaras de velocidad</b> que detectan en tiempo real la velocidad de los vehículos para que la policía de tránsito genere las multas correspondientes en caso de infracción.	Mejora la seguridad vial al sancionar a los vehículos que exceden los límites de velocidad permitidos.
<b>Cámaras en las intersecciones</b> que detectan si un conductor pasa el semáforo en rojo, para la posterior identificación de la matrícula y generación de la multa en caso de infracción.	Mejora la seguridad vial al sancionar a los vehículos que se pasan el semáforo en rojo.
<b>Sistema de cámaras de vigilancia en las intersecciones (J-Eyes)</b> que detectan varias situaciones como alta congestión o parqueo ilegal, permitiendo gestionar el tráfico desde el centro de control.	Mejora el flujo vehicular y permite la identificación y sanción de infractores.
<b>Sistema de cámaras de vigilancia en las avenidas</b> (conocidas por el nombre de EMAS) para detectar en tiempo real accidentes y niveles de congestión, que permite el despacho de las autoridades competentes para restaurar el flujo vehicular.	Reduce los niveles de congestión gracias a la rápida respuesta.
<b>Sistema de vigilancia de prioridad de buses.</b> Cámaras ubicadas en los buses que identifican vehículos que infringen la prelación que tienen estos vehículos para el uso de la línea prioritaria.	Disminuye los tiempos de desplazamiento y la variabilidad de los tiempos de espera de los buses.

Fuente: Elaborado a partir de Haque et al. (2013).

**3 Sistemas de gestión de la información.** Sirven para compartir información en tiempo real del tráfico y del transporte público. En el año 2014, la Autoridad del Transporte Terrestre adjudicó el diseño e implementación de un sistema de gestión de flota unificado para proveer

información en tiempo real a los centros de operación, a los conductores de bus y a los pasajeros y permitir el alineamiento de la oferta y la demanda en tiempo real (Sim, 2014). En el Cuadro 4.3 se describen las principales tecnologías implementadas.

Cuadro 4.3 — Tecnologías utilizadas en el sistema de gestión de la información

Tecnologías	Impacto
<p><b>Difusión en tiempo real de información sobre las condiciones de tráfico.</b> Incluyendo niveles de congestión, siniestros, parqueaderos disponibles y tiempo estimado de viaje. La información se adquiere de los sistemas de control, monitoreo y vigilancia descritos en los cuadros 4.1 y 4.2, además de la provista por los parqueaderos y el análisis de la información recolectada de los sistemas de posicionamiento global (<i>global positioning system</i> o GPS) de los taxis.</p> <p>La información puede ser consultada a través de aplicaciones móviles, dispositivos al interior de los vehículos o señalizaciones en las vías.</p>	<p>Permite a los usuarios planear sus rutas con anticipación y durante el viaje, evitando vías congestionadas, lo que se traduce en menor tiempo de traslado y menor congestión.</p> <p>Facilita la identificación de parqueaderos disponibles, reduciendo el tiempo empleado en su búsqueda y la congestión generada en el proceso.</p>
<p><b>Difusión en tiempo real de información relacionada con el transporte público.</b> Incluye un mapa del sistema de transporte público integrado, un planeador de viaje, servicios de información a bordo y un sistema de reserva de taxis.</p> <p>Es accesible a través de internet, aplicaciones móviles, mensajes de texto y señalizaciones dentro del sistema.</p>	<p>Permite a los usuarios planear su viaje, mostrando la ruta más rápida, económica o corta, utilizando diferentes modos de transporte.</p>

Fuente: Elaborado a partir de Haque et al. (2013).

**4 Sistemas de recaudo.** Se utilizan para procesar las transacciones relacionadas con el pago de tarifas y peajes. En el Cuadro 4.4 se describen las principales tecnologías implementadas.

Cuadro 4.4 — Tecnologías utilizadas en los sistemas de recaudo

Tecnologías	Impacto
<p><b>Recaudo de tarifas del transporte público y de parqueadero.</b> Sistema de pago electrónico multimodal (<i>Symphony for e-Payment</i> o SeP), que, a través de una tarjeta inteligente, permite abonar el pasaje de transporte público, el parqueadero e incluso pagar en establecimientos comerciales.</p>	<p>Disminuye el tiempo de viaje al acelerar el proceso de abordaje.</p> <p>Mejora la experiencia del usuario al utilizar una sola tarjeta.</p>
<p><b>Cobro de peajes.</b> Cobro automático de peajes utilizando tecnología de comunicación dedicada de corto alcance (<i>dedicated short range communications</i> o DSRC) del tipo V2I, que detecta el paso de los vehículos por los peajes al ingresar en una zona de alta congestión.</p> <p>Una segunda versión del sistema utiliza GPS para realizar el cobro por congestión por distancia recorrida y no por ingreso a la zona.</p>	<p>Disminución de los niveles de congestión en la ciudad al agilizar el cobro de los peajes.</p> <p>Cobro de congestión por distancia recorrida más justo.</p>

Fuente: Elaborado a partir de Haque et al. (2013).



## ¿Qué impacto han tenido las innovaciones realizadas?

El uso de la tecnología ha sido fundamental para facilitar la implementación e incrementar la eficiencia operativa de las diferentes medidas gubernamentales dirigidas a mejorar la sostenibilidad y seguridad del sistema de transporte.

En términos generales el uso intensivo de la tecnología ha servido para mejorar el flujo del tráfico, disminuir los niveles de congestión, aumentar la seguridad de los peatones y conductores, reducir el consumo de combustible y las emisiones contaminantes y hacer cumplir las normas viales. Además, mejora la experiencia del usuario, el cual, al contar no solo con un sistema de transporte seguro y confiable, sino también con información oportuna y veraz, puede tomar mejores decisiones, disminuyendo los tiempos de sus viajes. Todo esto ha incentivado el uso del transporte público por los ciudadanos.

## ¿Cuáles han sido las principales lecciones aprendidas?

Singapur ha realizado enormes esfuerzos para incentivar el uso del transporte público entre sus habitantes, implementando medidas relacionadas tanto con la oferta como con la

demanda del servicio. Es de resaltar el foco que han tenido en mejorar la experiencia del usuario, que ha sido clave para su alto nivel de adopción.

- La experiencia de Singapur deja claro que el uso de la tecnología facilita la implementación y mejora la efectividad de diversas soluciones que forman parte de una política a largo plazo.
- El nivel de complejidad y sofisticación de las tecnologías utilizadas depende de la aplicación particular. En muchos casos las tecnologías son complementarias.
- Nuevas tecnologías pueden cambiar la forma de aplicar una política. Ejemplo de lo anterior es la modificación del cobro de congestión, que pasó de percibirse al ingresar a la zona de congestión a pagarlo por distancia recorrida en dicha zona, haciéndolo más justo.
- Existe un potencial por explorar en términos del análisis y uso de la información recolectada por los diferentes sistemas, que permita, a través de técnicas de ciencias de datos, realizar predicciones que optimicen aún más el flujo vehicular y disminuyan la congestión.

## Movilidad como servicio: el caso de Helsinki (Finlandia)

### ¿Cuál es el problema?

Helsinki, capital de Finlandia, alberga en su área metropolitana una población aproximada de 1,4 millones de habitantes y cuenta con una extensión de 715 km<sup>2</sup>, de los cuales el 70 % corresponde a agua (Wikipedia, 2020a).

En Finlandia, desde la década de los años 60, el vehículo privado ha sido el medio de transporte preferido por la población. De acuerdo con Audouin y Finger (2018), en 2015 el 41 % de los viajes en el área metropolitana de Helsinki se realizó en vehículos privados, el 33 % en transporte público y el 26 % en modos no motorizados (bicicleta, a pie, etc.). Entre 1966 y 2008, se observó una tendencia creciente a la prevalencia del uso del vehículo privado sobre el uso del transporte público.

El crecimiento del número de vehículos en una ciudad trae consigo un incremento en los niveles de congestión y en los índices de contaminación ambiental, lo cual se traduce en un detrimento de la calidad de vida de sus habitantes. La ampliación de la infraestructura vial, como medida para reducir

la congestión de las ciudades, no resulta viable en muchos casos por limitaciones físicas o económicas y, cuando es viable, suele ser un proceso lento y costoso (Goodall et al., 2017).

Por otra parte, y a pesar de que el vehículo particular se constituye como el medio de transporte preferido por los usuarios, la tasa de utilización de este activo es demasiado baja, tan solo del 5 %<sup>50</sup>, según Heikkilä (2014).

Desde el punto de vista del usuario, existen varios inconvenientes al realizar un viaje de un lado a otro, ya que existe una variada oferta de modos de transporte, que, generalmente, son operados de manera independiente por el respectivo proveedor. A su vez, cada medio de transporte puede tener su propia forma de reservar, adquirir y pagar los tickets. Adicionalmente, existe en el mercado una variedad de aplicaciones complementarias para planificar los viajes, informar sobre las condiciones de tráfico, comparar tarifas, etc. Esta diversidad, aunque ofrece alternativas a los usuarios, también hace que, vista como un todo, la experiencia de

50 Equivalente a un uso promedio de activos de 8,4 horas por semana.

realizar un viaje en el transporte público resulte complicada e inclusive costosa en términos de tiempo y dinero.

### ¿Cómo lo resolvieron?

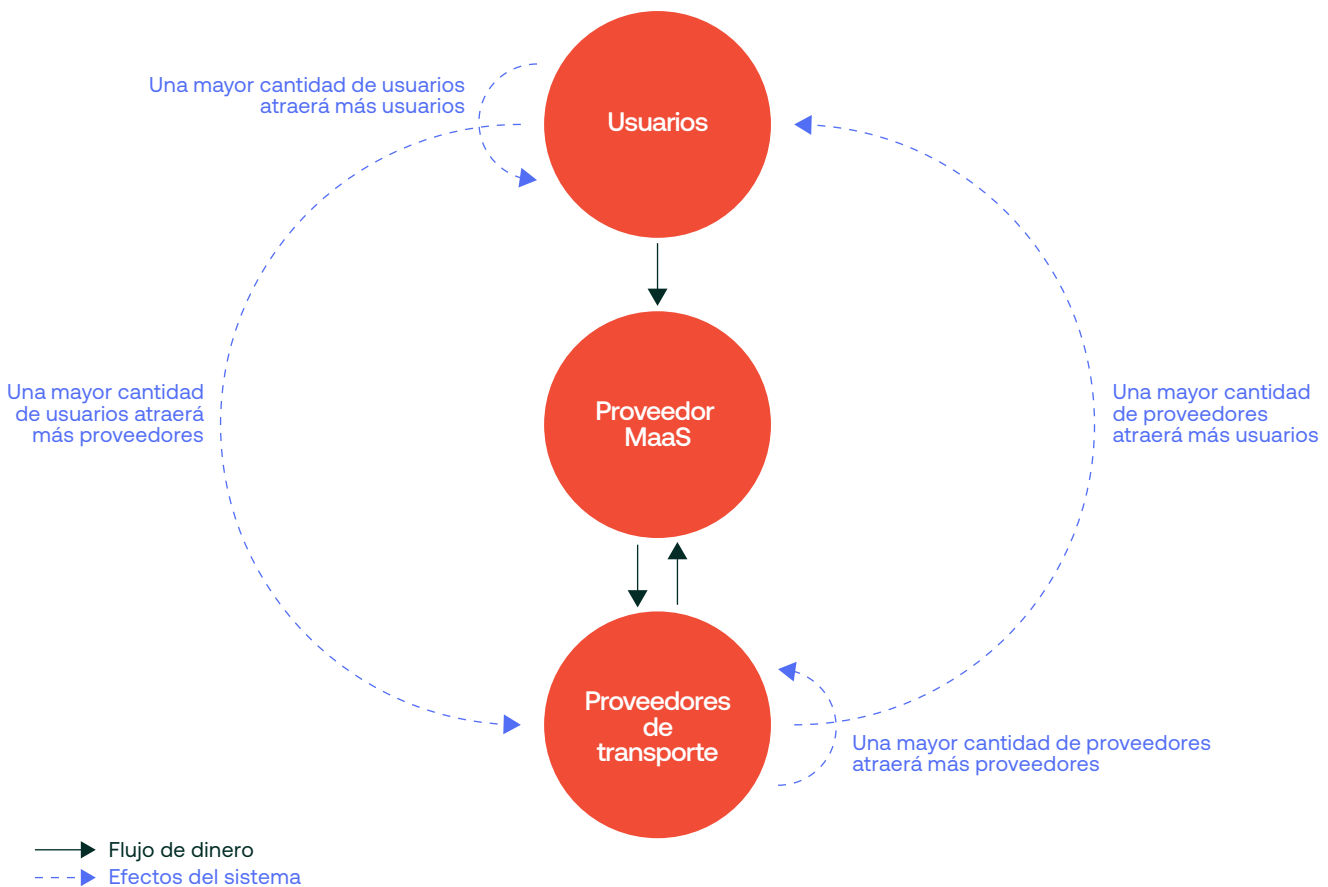
Movilidad como Servicio (*mobility as a service*), más conocido por sus siglas en inglés MaaS, es un concepto cuya visión consiste en lograr desincentivar el uso del vehículo privado como el medio de transporte preferido de las personas y así aliviar los problemas de congestión y contaminación creciente de las ciudades.

MaaS se define como el conjunto de soluciones de movilidad que se consumen como un servicio. Integra servicios de transporte de proveedores públicos y privados, en medios individuales y colectivos, a través de una única aplicación web o móvil, que permite diseñar un viaje según las necesidades

específicas del usuario y pagarlo mediante una sola cuenta (Audouin y Finger, 2018).

En noviembre de 2017, MaaS Global, una empresa emergente (*start-up*) finlandesa, cuyo CEO, Sampo Hietanen, es considerado a nivel mundial como el padre de ese concepto, lanzó al mercado la aplicación Whim como la solución a las necesidades de movilidad de los ciudadanos de Helsinki a través de un servicio único integrado. La aplicación incluye la planeación del viaje considerando las condiciones de tráfico y las preferencias de los usuarios, gestiona la reserva y los tickets electrónicos a diferentes modos de transporte (metro, tren, buses, taxis, bicicletas, vehículos rentados, Uber, etc.) y se encarga del recaudo. La compañía ofrece diferentes planes, que se ajustan a las necesidades de los usuarios y que van desde el pago por consumo y suscripciones mensuales hasta un consumo ilimitado (Whim, 2020).

Figura 4.1 — Concepto de MaaS



Los principios fundamentales del concepto MaaS son: orientación a mejorar la experiencia del usuario, empaquetamiento de servicios, alto grado de colaboración, interoperabilidad de diferentes modos de transporte y de operadores públicos y privados y uso intensivo de la tecnología para generar valor a los diferentes actores del ecosistema (Audouin y Finger, 2018; Jittrapirom et al., 2017).

El funcionamiento de MaaS (ver la Figura 4.1) es explicado a través de un ecosistema de servicios que involucra la interacción de diferentes actores mediante una plataforma digital. En su forma más simple, el ecosistema MaaS lo conforman: i) los usuarios del lado de la demanda, ii) los proveedores de transporte del lado de la oferta, y iii) el proveedor MaaS, que actúa como intermediario entre los actores de la oferta y la demanda.

El proveedor de MaaS compra capacidad de transporte a varios operadores y la empaqueta para venderla a los usuarios a través de una interfaz digital. El valor agregado del proveedor MaaS a sus clientes (usuarios y proveedores de transporte) se genera gracias al análisis de datos en tiempo real, que permite alinear las necesidades y preferencias de los usuarios con la oferta de transporte y con las condiciones de tráfico (Kamargianni y Matyas, 2017). Adicionalmente esta aplicación cuenta con una especificación de interfaz de programación de aplicaciones (*application programming interface* o API), denominada Representational State Transfer (RESP), para que los proveedores de servicios de transporte puedan ofrecer dichos servicios a través de Whim.

El ecosistema extendido incluye, además de los actores mencionados anteriormente, a proveedores de datos, infraestructura de TI, servicios de telecomunicaciones, sistemas de venta de tiquetes y recaudo, aseguradoras, sindicatos, gobiernos, reguladores e inversionistas, entre otros.

La adopción del concepto de MaaS depende en gran medida de la materialización de los efectos de red, es decir, del círculo virtuoso en la generación de valor agregado que se produce por la incorporación de más usuarios y proveedores al sistema.

Muchas tecnologías confluyen para la digitalización de los sistemas de transporte: la alta penetración de los teléfonos inteligentes, la presencia de redes de telecomunicaciones de alta velocidad, el *big data*, los sistemas de reserva de tiquetes y pago electrónico y el internet de las cosas, que digitaliza la infraestructura de la red. No obstante, desde el punto de vista tecnológico, lo que ha permitido el desarrollo de MaaS es el acceso abierto a datos a través de las API y la adopción de protocolos de elementos de la red que permiten la interoperabilidad.

## ¿Qué impacto han tenido las innovaciones realizadas?

Según el estudio de impacto realizado por Rambol (2019), los resultados de la aplicación Whim muestran una creciente aceptación y expansión del modelo y un cambio en los hábitos de los ciudadanos. Entre esos resultados están los siguientes:

- Hasta 2019, se habían realizado 3,8 millones de viajes y se contabilizaban 13.000 usuarios activos por mes, para un total de 70.000 usuarios registrados.
- EUR 53 millones en financiación.
- Los usuarios de Whim utilizan más el transporte público, realizando 2,15 viajes por día, mientras que el resto de los habitantes realiza 1,6 viajes por día.
- Los usuarios de Whim son multimodales; el 42 % de ellos combina la bicicleta con el transporte público; además, combinan el uso del taxi con el transporte público 3 veces más que el típico residente y viajan en taxi 2,1 veces más seguido que el resto de los ciudadanos. Estos viajes generalmente corresponden a los viajes del “último kilómetro”.
- Integración de varios modos de transporte (público, taxis, bicicletas, renta de vehículos y patinetas eléctricas).

Además de Helsinki, Whim tiene actualmente presencia en Birmingham, Amberes, Turku, Viena, Singapur y Tokio. Su plan de expansión incluye a otras ciudades de USA, Europa y Asia (Whim, 2018).

Por otra parte, diferentes ciudades han comenzado a implementar sus propias soluciones MaaS: UbiGo en Gothenburg (Suecia); Qixxit en ciudades de Alemania; Moovel en ese mismo país y en Boston, Portland (Estados Unidos) y Helsinki (Finlandia); Beeline en Singapur; SMILE App en Viena (Austria); Bridj en Boston, ciudades de Kansas y Washington D. C.; y Communauto/Bixi en la provincia de Quebec (Goodall et al., 2017).

## ¿Cuáles han sido las principales lecciones aprendidas?

De la experiencia, se concluye la necesidad de:

- Entender el estado de madurez de cada ciudad donde se desee implementar una solución MaaS en el ámbito social, regulatorio, tecnológico y de infraestructura de transporte.
- Utilizar un modelo de ecosistema, donde se identifiquen, para todos los actores involucrados, las motivaciones para formar parte o no del sistema a fin de alinear incentivos. La

- colaboración de los diferentes actores es determinante para la implementación de MaaS.
- Involucrar al sector público en las etapas tempranas, particularmente en la definición de los problemas de movilidad de las ciudades.
- Enfocarse más en la función (movilidad) que en la infraestructura de transporte.
- Considerar la experiencia del usuario en el diseño de la solución.
- La tecnología debe ser considerada como un facilitador para la integración de los servicios y para mejorar la experiencia del usuario.
- Aprender de la experiencia de otras industrias que han realizado o están realizando su transición a un modelo por servicio.

## Implementación de cargos por congestión en Estocolmo (Suecia)

### ¿Cuál es el problema?

Estocolmo, capital de Suecia, con una extensión de 382 km<sup>2</sup>, está conformada por 14 islas en un extenso archipiélago en el mar Báltico, comunicadas por más de 50 puentes. En el área metropolitana de Estocolmo residen 2,4 millones de personas (Wikipedia, 2020b).

La capacidad de la red vial de la ciudad resultaba insuficiente para atender la demanda. Según Eliasson (2008), el crecimiento del tráfico urbano se mantuvo estable desde los años 70 hasta principios de los años 90 tanto en el centro como en las afueras de la ciudad; sin embargo, a partir de esa última década, el crecimiento del tráfico en la zona central, a diferencia del de las afueras, se estancó debido a que simplemente se llegó a la utilización de la capacidad máxima de la red vial.

En el año 2006, la congestión en el centro de Estocolmo era demasiado alta para su tamaño. Eliasson (2008) estima que el índice de congestión<sup>51</sup> en esa área en octubre de 2005 alcanzaba el 180 % y en las principales avenidas que llevan a ella, el 200 %.

Son varios los factores que influyeron en el incremento del tráfico en el centro, entre los que se destacan: i) el rápido crecimiento de la población aunado al aumento de su poder adquisitivo, que acrecentó el número de vehículos en las vías; ii) el aumento de la longitud de los trayectos, que hacía que un número mayor de vehículos confluyera de manera simultánea en las vías, y iii) la topología propia de la ciudad, con amplias zonas verdes y rodeada de agua, que se constituye como una limitación natural para la ampliación de la red vial.

### ¿Cómo lo resolvieron?

Desde el año 2002, el Gobierno estaba considerando la implementación de cargos de congestión en la ciudad, lo cual generó fuertes críticas de varias fuerzas políticas, relegando su implementación varios años. Tiempo después se empezó a discutir nuevamente el tema, resurgiendo las críticas tanto de grupos políticos, como de la prensa y la ciudadanía en general. Según Eliasson (2014), el 39 % de los artículos de prensa se mostraron en contra de la iniciativa. Luego de álgidos debates y con gran escepticismo, se decidió adelantar una prueba piloto, que evidenciaría los posibles beneficios o, por el contrario, confirmaría las ya populares críticas a la iniciativa. La decisión final de la implementación definitiva o no de los cargos de congestión resultaría de la realización de un referendo posterior a la prueba piloto, cuyos resultados serían aceptados por todos los grupos políticos.

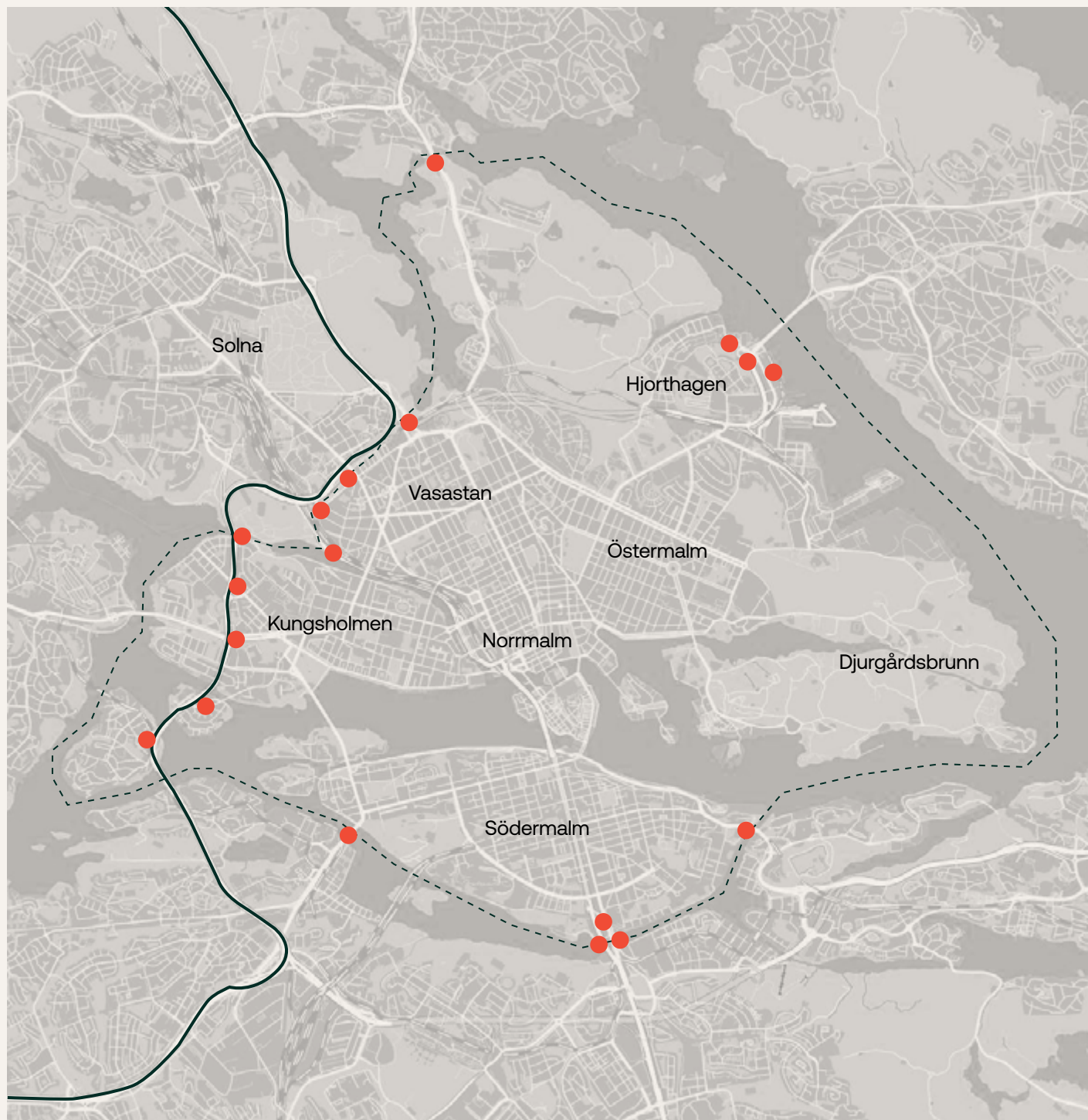
Entre el 3 de enero y el 31 de julio de 2006, se implementó en la ciudad el piloto del denominado “cargo de congestión”, el cual consistió en cobrar un peaje al ingresar o salir del centro de la ciudad con el fin de desincentivar el uso del vehículo privado en dicha zona<sup>52</sup>.

El objetivo del piloto consistió en evaluar si la eficiencia del sistema de transporte podía mejorarse al implementar los cargos de congestión. Con el peaje, se esperaba reducir los niveles de congestión, aumentar la accesibilidad y mejorar las condiciones ambientales en el centro de la ciudad. El principal indicador de desempeño era la reducción del tráfico vehicular de la zona entre un 10 % y 15 % (Eliasson, 2014).

<sup>51</sup> Indicador que mide el incremento en el tiempo promedio de viaje tomando como referencia el tiempo que tomaría hacer el mismo recorrido en ausencia de tráfico. Por ejemplo, un índice de congestión del 200 % significa un tiempo promedio de viaje de 3 veces el tiempo empleado para la misma distancia sin tráfico.

<sup>52</sup> Ver Eliasson et al. (2009)

Figura 4.2 — Mapa descriptivo de los límites geográficos para la aplicación de cargos de congestión en Estocolmo



Nota: La línea punteada limita la zona donde se aplica el cargo por congestión, los puntos naranjas representan los puntos de cobro digitales, y la línea sólida es el corredor de Essinge, libre de peaje. Fuente: Tomado de Eliasson (2014).



Durante el transcurso de la prueba piloto, la opinión de la ciudadanía y de la prensa fue cambiando de forma gradual al observar efectos inmediatos y evidentes en la congestión vial del centro de la ciudad. En el referendo que siguió al piloto, el 53 % de los votos válidos fueron a favor de la implementación de los cargos de congestión (Eliasson et al., 2009), lo cual representa un ejemplo de innovación social de gran interés para estudio.

La base teórica sobre la que se desarrolla el concepto de cargo de congestión consiste principalmente en lo siguiente: i) las vías son un recurso escaso, cuyo uso eficiente debe ser administrado por el gobierno, y una de las formas de gestionarlo es cobrar un valor por la congestión que se genera al hacer uso de dicho recurso; ii) los conductores son sensibles al precio de conducir, por tanto, al incrementar ese precio en ciertos lugares y a ciertas horas, el número de vehículos en esas zonas y horarios debería disminuir (Eliasson, 2014); y iii) el cargo de congestión es una herramienta que permite al usuario de la red vial interiorizar los costos generados a los otros usuarios al realizar un viaje (Universidad de los Andes y UCL, 2013).

El valor del peaje, que oscila entre EUR 1 y 2, con un límite de EUR 6 por día, se cobra al entrar y salir del cordón (no se realiza cobro alguno por desplazamientos dentro del cordón) y el precio varía en función de la hora (mayor valor en la hora pico, sin cobro durante la noche) y del día de la semana (sin cobro en fines de semana ni feriados). Se eximió del pago del cargo de congestión a buses, taxis, vehículos ecológicos y a los vehículos que se movilizaban desde y hacia la isla de Lidingö, por lo que no se recibía ingreso alguno por aproximadamente el 30 % de los pasos por los puntos de cobro (Eliasson et al., 2009).

Se instalaron 18 puntos de cobro digitales (puntos rojos en la Figura 4.2), que registran de forma automática el ingreso de los vehículos al cordón a través del uso de dos tecnologías complementarias: 1) comunicaciones de corto alcance (DSRC) del tipo V2I, que consisten en un conjunto de antenas instaladas en pórticos sobre la vía o postes al lado de la misma que se comunican con una unidad en el vehículo; y 2) reconocimiento automático del número de matrícula (*automatic number plate recognition* o ANPR) que consiste en un conjunto de cámaras que fotografían la matrícula de los vehículos para su identificación (Universidad de los Andes y UCL, 2013). En el piloto, se priorizó el uso de la tecnología DSRC. Sin embargo, debido a su óptimo desempeño, se decidió utilizar la tecnología ANPR para la implementación definitiva del sistema (Eliasson, 2008).

El cobro del cargo de congestión se realiza mensualmente y, según Eliasson (2008), se estima que, a octubre de 2008,

el 80 % de los pagos se realizaba de forma automática, debitando el importe a las cuentas bancarias de los usuarios, mientras que el restante 20 % de los pagos se realizaba en locales comerciales.

### ¿Qué impacto han tenido las innovaciones realizadas?

Las principales estadísticas del impacto de la implementación del piloto de cargos de congestión en Estocolmo, según Eliasson et al. (2009), son las siguientes:

- El tráfico vehicular a través del cordón se redujo en promedio un 22 % respecto al año 2005. En el primer mes del piloto la disminución fue del 27 % y en los siguientes cinco meses se estabilizó en el 22 %, alcanzando una disminución máxima del 30 % en el mes de julio de 2006. Cabe destacar que, al finalizar el piloto, se observó una disminución del tráfico de aproximadamente el 8 %, lo que indica un cambio en los hábitos de los ciudadanos.
- El tiempo promedio de viaje se redujo como consecuencia de la disminución del tráfico. En las principales avenidas se observó una reducción de hasta el 30 % durante la hora pico de la mañana y de hasta un 50 % en la hora pico de la tarde.
- La confiabilidad de la duración del tiempo de viaje aumentó hasta en un 30 % como consecuencia de la disminución del tráfico.
- En términos ambientales, las emisiones en el centro de la ciudad se redujeron entre un 10 % y un 15 %. Las emisiones de dióxido de carbono bajaron un 14 %, mientras que las de partículas contaminantes suspendidas en el aire disminuyeron entre un 10 % y un 14 %, y las de óxidos nitrosos, en un 8,5 %, mejorando la calidad del aire.
- La mejora en la calidad del aire trajo consigo una mejora en las condiciones de salud de los habitantes. Se estima una disminución de entre 20 y 25 muertes prematuras por año en el centro de la ciudad y de 25 a 30 en el área metropolitana.
- La seguridad vial aumentó. Se estima que hubo una reducción en el número de lesiones relacionadas con el tráfico vehicular en el centro de la ciudad de entre el 5 % y el 10 %, lo cual equivale a 40-70 lesiones por año.
- El uso del transporte público se incrementó en un 4,5 % como resultado de la implementación del cargo de congestión.

## ¿Cuáles han sido las principales lecciones aprendidas?

De esta experiencia se puede concluir la necesidad de:

- Definir objetivos claros, relevantes, consistentes y cuantificables desde la ideación del proyecto (Eliasson, 2014).
- Incluir objetivos relacionados con el impacto ambiental, la calidad de vida o los efectos positivos en la salud, que, aunque no son fáciles de correlacionar con las medidas de disminución del tráfico, pueden facilitar la aprobación del proyecto por parte de los encargados de darle viabilidad y del público en general (Eliasson et al., 2009).
- Estudiar de forma temprana el entorno legal que permita implementar las soluciones técnicas (Eliasson, 2014).
- Considerar a todos los actores interesados en el proyecto y gestionar su vinculación o relación con él para evitar tropiezos en su desarrollo (Eliasson, 2014).
- Confiar a expertos el diseño del modelo. Adicionalmente, debido al alto nivel de complejidad y especificidad de cada ciudad, es necesario invertir suficiente tiempo y recursos para el desarrollo de un modelo particular (Eliasson, 2014).
- Considerar en el diseño del modelo el compromiso entre efectividad y sencillez. Si bien es cierto que un sistema fácil de entender para el público en general puede ser adoptado más fácilmente, su eficiencia puede verse comprometida (Eliasson, 2014; 2008). No se debe subestimar la capacidad de los ciudadanos de asimilar sistemas complejos de tarifas, como es el caso de las tarifas dinámicas utilizadas, por ejemplo, por Uber (Eliasson, 2014).
- Definir niveles de servicio costoeficientes al formular los requerimientos técnicos de la solución (Eliasson, 2014).
- Definir formas de pago costoeficientes y orientadas a mejorar la experiencia del usuario (Eliasson, 2014).
- Al implementar el proyecto, procurar victorias tempranas que, a través del logro de resultados, mejoren la percepción del proyecto y le den el impulso necesario para facilitar su continuidad (Eliasson, 2014).
- Complementar la implementación de los cargos de congestión con otras iniciativas que mejoren la oferta de transporte público y el uso de medios alternativos de transporte, como la bicicleta (Eliasson et al., 2009).

## La digitalización en la integración del sistema de transporte público de Santiago (Chile)

### ¿Cuál es el problema?

Santiago, capital de Chile, tiene una población de 6,2 millones de habitantes según datos del censo de 2017. La ciudad se divide en 34 comunas, con marcadas diferencias socioeconómicas entre las de ingreso alto y bajo. La forma de la ciudad es circular, lo cual implica una gran cantidad de viajes desde los suburbios al centro en horas de la mañana y en sentido contrario en la noche (Munizaga, 2010).

La ciudad cuenta con metro desde septiembre de 1975, año en que se inauguró la primera línea. Por otra parte, hasta el año 2007, muchos ciudadanos se desplazaban de un punto a otro de la ciudad utilizando buses que realizaban recorridos muy extensos y demorados, y que usualmente se encontraban repletos de personas. El pago del tiquete se realizaba con dinero y en la mayoría de los casos era el conductor quien se encargaba del recaudo, lo cual, además de incrementar el tiempo de viaje por generar demoras en el abordaje del vehículo, podía ocasionar siniestros, ya que el conductor pierde su concentración al conducir (Quezada y Amaro Yazim, 2016).

### ¿Cómo lo resolvieron?

En febrero de 2007, se inauguró Transantiago (hoy conocido como Red Metropolitana de Movilidad), sistema de transporte integrado multimodal compuesto por el servicio de buses, de metro y el tren suburbano Metrotren Nos.

Administrativamente, Transantiago es coordinado y supervisado por el Directorio de Transporte Público Metropolitano, agencia estatal que depende del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. La operación de los buses está a cargo de siete compañías privadas, cada una con una flota de entre 400 y 1.200 buses. Por su parte, el metro y Metrotren Nos son operados respectivamente por Metro S.A. y Tren Central, compañías de capital estatal. Adicionalmente, existen cuatro empresas que ofrecen servicios complementarios al sistema: el de administración financiera; el de gestión, venta y red de recarga de la tarjeta inteligente; servicios tecnológicos para las compañías de buses; y servicios tecnológicos para el metro (Gschwender et al., 2016).

El sistema de buses lo componen 6.500 vehículos equipados con GPS, operando en una red vial de 150 km de uso exclusivo y 68 km de uso compartido, con prioridad en horas pico y 11.000 paraderos (Gschwender et al., 2016). El sistema de metro cuenta actualmente con siete líneas operativas, 136 estaciones y 229 trenes que recorren los 140 km de vías. Por su

parte, Metrotren Nos une la Estación Central de Santiago con la localidad de Nos, en la comuna de San Bernardo, y cuenta con 10 estaciones a lo largo de sus 20 km de longitud (DTP Metropolitano, 2020a).

Cuadro 4.5 — Elementos tecnológicos de los SEPP

Componente	SEPP de Transantiago
<p><b>Medio de pago</b></p> <p>Es el soporte del pago del viaje del usuario y permite el ingreso al sistema y los trasbordos dentro del mismo. Pueden ser:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Tarjetas inteligentes sin contacto</li> <li>– Tarjetas de banda magnética</li> <li>– Llaveros electrónicos</li> <li>– Teléfono móvil</li> </ul> <p>Las tarjetas plásticas y llaveros electrónicos contienen un chip que almacena, procesa y registra los datos, tanto del viaje como del usuario.</p> <p>La validación puede ser con o sin contacto, dependiendo de la tecnología que integren: chips de identificación por radiofrecuencia (RFID), chips de comunicación de campo cercano (<i>near-field communication</i> o NFC) o bandas magnéticas.</p>	<p>Tarjeta bip!</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Tarjeta inteligente sin contacto MIFARE Classic</li> <li>– Validación por RFID</li> </ul>
<p><b>Dispositivos de validación</b></p> <p>Son los elementos que autorizan y validan el ingreso o reingreso al sistema.</p> <p>El validador cuenta con un módulo de acceso seguro (<i>secure access module</i> o SAM), programado con las llaves criptográficas del sistema, el cual lee la información del medio de pago (tarjeta) y encripta nueva información. La transacción puede demorar entre 0,1 y 0,5 segundos y se realiza colocando la tarjeta (o el elemento de pago) a una distancia variable (3-10 cm), dependiendo de la tecnología que utilicen.</p> <p>Ejemplos de ello son las máquinas validadoras en estaciones con torniquetes o las puertas o dispositivos a bordo de los buses.</p>	<p>Validadores en buses, metro y Metrotren Nos</p>
<p><b>Puntos de venta</b></p> <p>Consisten en sitios donde se puede adquirir el medio de pago, hacer una recarga o consultar el saldo y las tarifas.</p> <p>Pueden ser máquinas expendedoras automáticas o manuales ubicadas en las estaciones o en locales comerciales, taquillas, aplicaciones móviles o páginas web.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Puntos bip!</li> <li>– 50 centros bip!</li> <li>– Estaciones de metro</li> <li>– Locales comerciales</li> <li>– Internet</li> <li>– Cajeros automáticos</li> <li>– Vía telefónica</li> <li>– Webpay</li> <li>– CMR Falabella</li> </ul>
<p><b>Sistema de gestión de datos</b></p> <p>Utiliza distintos elementos de <i>hardware</i> para la recolección de información y de <i>software</i> para su procesamiento. Los componentes principales son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Elementos periféricos y dispositivos de validación</li> <li>– Concentrador en estaciones</li> <li>– Centro de control</li> </ul> <p>Las tecnologías de recaudo permiten almacenar información en la misma tarjeta, por lo que la conexión con el centro de control puede ser en tiempo real o no.</p> <p>Cuando sucede la conexión, se realiza el proceso de <i>back office</i>, que consiste en la actualización y comparación de registros de recargas y validaciones.</p> <p>El centro de control registra todas las transacciones realizadas en el sistema.</p>	<p><b>Sistema sin conexión (<i>off line</i>)</b></p> <p>Las tarjetas bip! son los dispositivos con la información más actualizada del usuario y sus viajes en todo el sistema.</p> <p>La descarga de los datos acumulados en el validador del bus se realiza de forma inalámbrica y automática al llegar a la estación terminal. Posteriormente, estos datos son agregados al registro oficial del centro de control, en un proceso denominado <i>clearing</i>.</p> <p>Con esta información se determina cómo han de repartirse los gastos, las responsabilidades y ganancias entre las distintas empresas que integran el sistema de transporte.</p>

Fuente: Elaborado a partir de Crotte et al. (2018), Quezada y Amaro Yamin (2016) y DTP Metropolitana (2020b).



En términos de tarifas, se utiliza una tarifa integrada por viaje que permite realizar hasta dos transbordos en un período de dos horas en una misma dirección. Si el viaje se realiza en hora pico o incluye el uso del metro, el valor del pasaje es un poco mayor (DTP Metropolitano, 2020b).

El sistema electrónico de pago de pasajes (SEPP) se basa en una tarjeta inteligente sin contacto, denominada Tarjeta bip!. Esta tarjeta constituye la única opción de acceso y pago en los buses y es la más popular en el metro, utilizada en el 97 % de los cerca de 4,5 millones de viajes diarios realizados en el sistema de transporte público (Gschwender et al., 2016).

La solución tecnológica del SEPP de Transantiago fue desarrollada por la empresa chilena Sonda, luego de resultar adjudicataria de la correspondiente licitación pública (Quezada y Amaro Yazim, 2016).

En el Cuadro 4.5 se realiza una descripción de los elementos tecnológicos de los SEPP y se presentan aquellos utilizados en Transantiago.

### ¿Qué impacto han tenido las innovaciones realizadas?

La implementación del sistema integrado de transporte en la ciudad de Santiago ha permitido:

- La combinación e interoperabilidad de diferentes modos de transporte (buses, metro y metrotren) y de operadores públicos y privados.
- El establecimiento de una tarifa integral con la que se pueden realizar hasta dos transbordos entre los diferentes modos de transporte en un período de tiempo no mayor a dos horas, siempre y cuando se viaje en una misma dirección. Para muchos usuarios, esto representa una disminución en los costos de transporte.

## **Análisis de movilidad a través del *big data* en la provincia de Neuquén, en la Patagonia argentina**

### ¿Cuál es el problema?

Neuquén, con una población aproximada de 231.000 habitantes, según el censo de 2010, y una superficie de 127,49 km<sup>2</sup>, es la ciudad más poblada de la Patagonia argentina. El área metropolitana de Neuquén es un aglomerado integrado por municipios de dos jurisdicciones provinciales (Neuquén, Centenario, Plottier, Senillosa, Cipolletti y Cinco

- Reemplazar el uso del dinero en efectivo para el pago del pasaje, agilizando el acceso a los buses y minimizando el riesgo de siniestros.
- Facilitar la implementación de tarifas reducidas para grupos de interés, como estudiantes y personas de la tercera edad.
- Con base en la información recolectada a través de la tarjeta bip! y los GPS de los buses, y gracias a un acuerdo de cooperación entre la Universidad de Chile y el Directorio de Transporte Público Metropolitano, se han realizado diferentes estudios. Entre ellos se destacan análisis de rutas origen-destino, evaluación de la calidad del servicio, estudio de la velocidad de los buses y seguridad del medio de pago. Sus resultados han sido tomados en cuenta tanto por la Administración como por los operadores para mejorar el servicio y la eficiencia del sistema (Gschwender et al., 2016).

### ¿Cuáles han sido las principales lecciones aprendidas?

- Resulta importante garantizar la interoperabilidad de la tarjeta inteligente para que pueda ser utilizada en los diferentes sistemas de transporte. En el caso de Santiago, la tarjeta bip! puede ser utilizada tanto en los buses como en el metro. Lo anterior mejora la experiencia de los usuarios, quienes ven una única solución a sus necesidades de transporte, aunque dicha solución sea provista por diferentes compañías.
- Dado que la tarjeta bip! es el único medio de pago para acceder a los buses, es importante contar con un sistema de venta y recarga de tarjetas por toda la ciudad que garantice el acceso a toda la población.
- Es fundamental definir un esquema claro de repartición de gastos, ganancias y responsabilidades entre las distintas empresas que conforman un sistema de transporte integrado. Con la información recolectada en tiempo real a través de la tarjeta inteligente, se facilita la implementación de dicho esquema de forma eficiente y transparente.

Salto), alcanzando una población de 420.000 habitantes aproximadamente (UPEFE, 2013).

El crecimiento acelerado de la población de Neuquén, que entre 2001 y 2010 ha registrado una tasa del 14,8 %, y el hecho de ser el principal polo de atracción de flujos urbanos plantean a la Administración local el desafío de diseñar soluciones de movilidad sostenible. En particular, resulta de gran importancia

el reto de disponer de modelos para estimar la demanda de transporte por parte de los ciudadanos, que permitiría, en una primera fase, diseñar las rutas, paradas y frecuencias de los buses del nuevo sistema de transporte público urbano y, en una segunda fase, analizar la movilidad de la zona metropolitana y las municipalidades vecinas.

### ¿Cómo lo resolvieron?

Para desarrollar estudios de movilidad urbana y planificación del transporte se suele utilizar como herramienta de análisis la matriz origen-destino, que estima el número agregado de viajes entre varias zonas de una ciudad y los clasifica según el medio de transporte, el motivo del viaje o el período del día. La información suele ser recolectada a través de encuestas domiciliarias de movilidad, que, a pesar de ofrecer información valiosa para desarrollar los modelos, presenta varias debilidades. Entre ellas se destacan: altos costos, un proceso largo y laborioso, información sesgada por la dificultad de entrevistar a ciertos grupos poblacionales, omisión por parte de los entrevistados de algunos viajes por no considerarlos importantes, rápida desactualización de los datos por el largo tiempo transcurrido entre la realización de las encuestas y el análisis de la información, y falta de información sobre movilidad en días atípicos, como los no laborables.

En la municipalidad de Neuquén, a través de un proyecto liderado por la Administración local, financiado por el BID e implementado por Telefónica, se realizó un estudio de movilidad urbana utilizando herramientas de *big data*. El objetivo era analizar información proveniente de los teléfonos móviles, reemplazando así las encuestas de movilidad como fuente primaria de información y resolviendo en gran medida las debilidades de dichas encuestas.

La actividad de cada teléfono móvil se puede seguir a través de los registros detallados de llamadas (*call detail record* o CDR) y registros de sesiones de datos (*internet access logs*), también denominados xDR. Ante la ocurrencia de eventos como llamadas, envío o recibo de mensajes de texto para el caso de los CDR o intercambio de paquetes de datos al entrar a internet para el caso de los xDR, se registran varios atributos de dicho evento. Entre esos atributos se encuentran la hora, duración, identificación de la fuente, del destino y de la antena a la que se conecta el dispositivo, entre otros, pero sin incluir el contenido de la transacción. Una forma más precisa de determinar la localización del teléfono móvil es por triangulación de señales de al menos tres antenas (Rendón et al., 2020; Gutiérrez Puebla et al., 2019).

El análisis de los registros de actividad de los teléfonos móviles de cada usuario constituye lo que se conoce como la huella digital, arrojando información de localización del usuario en el espacio y en el tiempo (ver la Figura 4.3). De

esta forma, es posible determinar los periodos en los que una persona permanece en un mismo lugar (secuencias de registros consecutivos en una misma localización) y los viajes entre lugares (registros consecutivos en los que cambia la localización del usuario) (Gutiérrez Puebla et al., 2019).

Los datos de tráfico se enriquecieron con información recolectada a través de encuestas enviadas por mensajes de texto (SMS). Por este medio, se obtuvo, entre otras cosas, información sociodemográfica, el motivo del viaje y el método de transporte utilizado.

Los datos son extraídos en un período de tiempo determinado, anonimizados para proteger la identidad de los usuarios, agregados en zonas espaciales y, finalmente, extrapolados para representar a la población total de la ciudad. A partir del análisis de datos es posible determinar los patrones de movilidad de los usuarios y generar matrices de viajes origen-destino tanto totales como por franjas horarias (Gutiérrez Puebla et al., 2019).

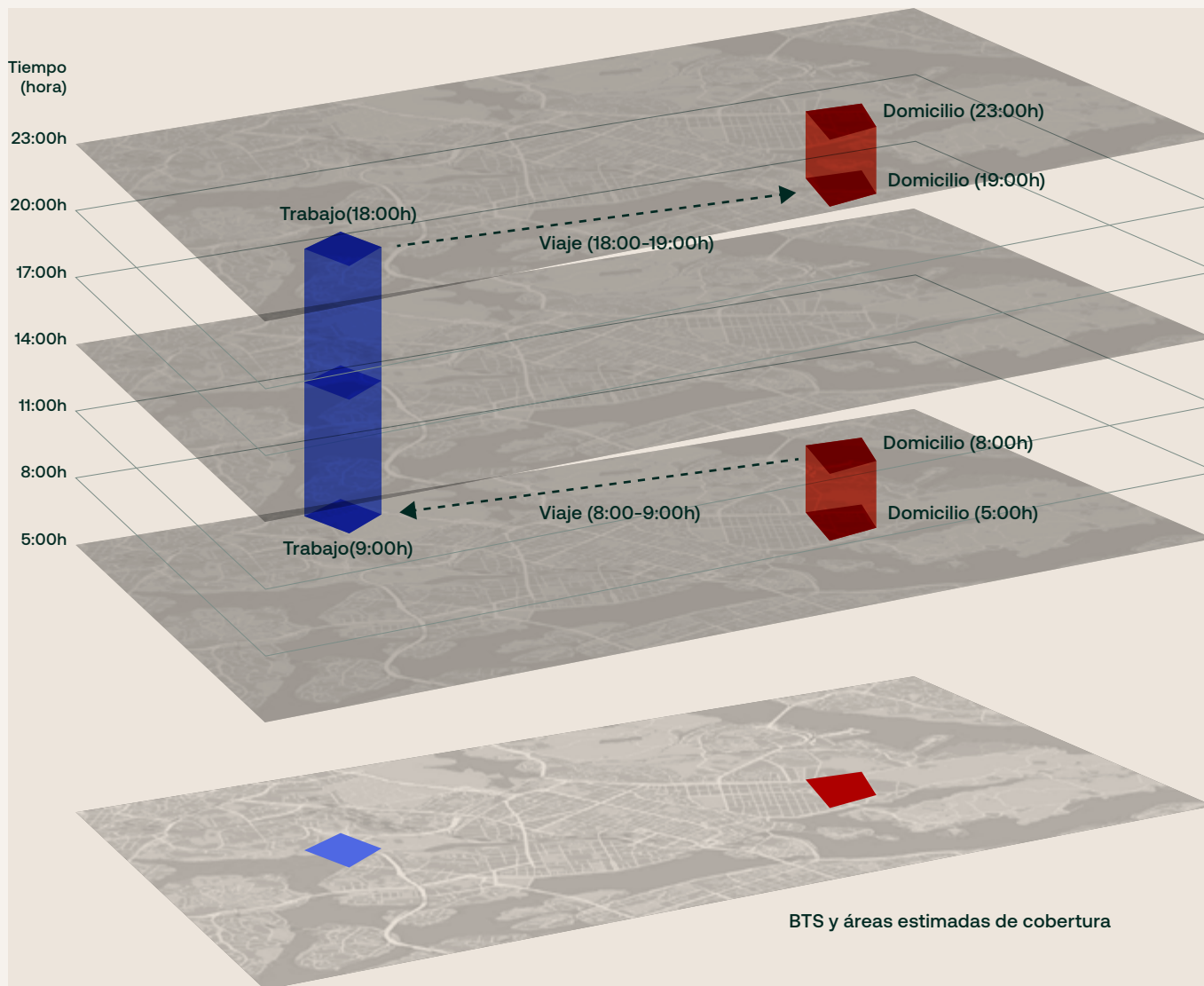
### ¿Qué impacto han tenido las innovaciones realizadas?

Para la primera fase, realizada en 2016, se destacan los siguientes impactos (LUCA, 2020):

- Mejor organización de la planificación del transporte público en la ciudad.
- Capacidad para medir y caracterizar el flujo de viajes dentro de la ciudad.
- Conocimiento de las zonas de producción y atracción del tránsito.
- Detección de tendencias sobre flujos de población.
- Respaldo del diseño del nuevo sistema de transporte público de Metrobus, incluyendo la definición del trazado y la frecuencia de las rutas, así como la ubicación de los paraderos.

La segunda fase del proyecto, que incluyó además de la ciudad de Neuquén a ocho municipalidades de las provincias de Neuquén y Río Negro, cuyos resultados fueron presentados en 2017, ofreció información que debía permitir a las autoridades locales definir un sistema de transporte público regional. También debía facilitar la creación de un sistema de movilidad urbana que desalentara el uso del vehículo particular, ya que el estudio arrojó que el 55 % del más millón de viajes semanales se realiza por este medio de transporte y que diariamente ingresan en Neuquén cerca de 100.000 vehículos provenientes de otras municipalidades, que incrementan los niveles de congestión de la ciudad (Neuquen Capital, 2020).

Figura 4.3 — Trayectoria de espacio temporal a partir de la huella digital



Fuente: Elaborado a partir de Gutiérrez Puebla et al. (2019).

## ¿Cuáles han sido las principales lecciones aprendidas?

- La información de la actividad de los teléfonos móviles se constituye como una alternativa atractiva a las tradicionales encuestas domiciliarias para la construcción de modelos de movilidad. Sin embargo, para realizar un análisis que incluya características sociodemográficas de la población es necesario complementar los datos recolectados de forma automática con encuestas.
- El gran volumen de datos generados a partir del registro espaciotemporal de las actividades de los ciudadanos en sus teléfonos móviles requiere de herramientas de *big data* para la gestión, análisis y visualización de dichos datos.
- Resulta necesario garantizar la anonimidad de los datos y realizar su análisis de forma agregada para proteger la identidad y garantizar la seguridad de los usuarios. Hay que considerar que el hecho de conocer la identidad de los usuarios no afecta los resultados de los modelos,

puesto que lo que se necesita conocer para facilitar la toma de decisiones es el flujo agregado (y no individual) de tráfico.

- El desarrollo de modelos y estrategias basadas en datos hace necesario la conformación de equipos interdisciplinarios con conocimientos no sólo en temas de transporte y movilidad, sino también en ciencias de datos.
- Es importante revisar la regulación de cada país en relación con el acceso y uso de la información generada en los teléfonos móviles, de forma que permita a operadores de telecomunicaciones, empresas de análisis de datos, consultoras de movilidad y entidades del gobierno acceder y utilizar los datos para generar modelos y estrategias de movilidad.

El caso de Neuquén es un ejemplo de una alianza público-privada que permitió desarrollar ágilmente un modelo de movilidad utilizando tecnología de punta para soportar las decisiones administrativas de la ciudad.

## La digitalización del Metro de São Paulo (Brasil)

### ¿Cuál es el problema?

El metro de São Paulo es un sistema de transporte público que cuenta con 101 km de extensión, divididos en seis líneas con 89 estaciones, y circula a una velocidad media de 60 km/h. Es operado por la Empresa Metropolitana de São Paulo (METRO), una compañía de capital mixto, donde la parte mayoritaria pertenece al Gobierno de São Paulo, que ejerce el control de sus actividades.

Este metro es uno de los más modernos de Latinoamérica. Cuenta con estaciones con puertas de andén, brindando así una mayor seguridad a los usuarios, y la operación de los trenes es automática, sin requerir la asistencia de un conductor. El control de los trenes se realiza mediante un sistema que utiliza comunicaciones bidireccionales entre el tren y los sistemas de gestión de tráfico desplegados sobre la ferrovía (communications based train control o CBTC), permitiendo determinar la posición exacta de un tren. Además, tiene sensores de proximidad, transmisores de ubicación y cámaras, que hacen posible la operación automática del sistema.

En caso de perder la comunicación con el centro de control, el tren puede continuar operando, ya que dispone de sensores para detectar anomalías en las vías y recabar otros datos requeridos para su funcionamiento, información que es procesada en el ordenador instalado en su interior con el fin de analizar los riesgos y controlar su marcha (UOL, 2019; Railway Technology, 2021; CAF, 2021).

Un centro de control operacional (CCO) está a cargo de regular el funcionamiento del sistema. Este sistema permite monitorizar el consumo de energía de las estaciones y equipos del metro, así como controlar el flujo de la flota (Railway Technology, 2021; CAF, 2021).

Por sus características, el CBTC permite aumentar la seguridad del sistema, dado que evita que se cometan errores humanos, y ofrecer un servicio más eficiente. Adicionalmente, optimiza el consumo de energía al enviar información sobre dicho consumo y el funcionamiento de los aires acondicionados.

Entre los puntos susceptibles de mejora en la operación del sistema, se identificó optimizar los niveles de consumo energético y minimizar los fraudes asociados con el pago de los pasajes.

### **¿Cómo lo resolvieron?**

En el año 2019 la Empresa Metropolitana de São Paulo abrió una licitación para la implementación de un sistema electrónico de monitoreo para las tres primeras líneas del metro (1-Azul, 2-Verde, 3-Roja) que incluía el diseño, suministro, instalación y pruebas de los equipos de imágenes para monitorear a las personas, las instalaciones del metro y el CCO, entre otros. Este sistema incluía funciones de inteligencia, tales como el reconocimiento facial, la identificación y seguimiento de objetos y un novedoso sistema de detección de invasión de áreas. El objetivo principal con la instalación de este sistema era mejorar y aumentar su seguridad operativa, teniendo una autonomía de hasta 30 días en el almacenamiento de las imágenes (Alamys, 2019).

De acuerdo con la Asociación para Maquinaria de Computación (ACM, por sus siglas en inglés), la plataforma cuenta con 5.200 cámaras digitales de alta definición, capaces de escanear los rostros de 4 millones de pasajeros por día, y nutrir la base de datos de la policía para ayudar a las autoridades a localizar a delincuentes (Mari, 2020).

Por otra parte, con el fin de mejorar los niveles de consumo de energía, en el año 2020, el Metro de São Paulo, en conjunto con 14 empresas y consorcios, inició un proyecto de implementación de energía renovable para alimentar la operación del metro, en combinación con un sistema de control para optimizar el uso de los recursos energéticos. Este proyecto permitirá controlar el consumo de energía en función de la cantidad de usuarios que estén en el suburbano y la capacidad de generación de las fuentes de energía alternativa (PV Magazine, 2020). Adicionalmente, este sistema de control interactuará con las cámaras de video, el sistema de monitoreo SCADA y los GPS de cada tren (Electricidad, 2015).

### **¿Qué impacto han tenido las innovaciones realizadas?**

Según un responsable de ViaQuatro, la empresa concesionaria de la línea 4 del metro, la implantación del sistema a través del cual se optimizará el consumo de los recursos energéticos permitirá ahorrar un 30 % de la energía consumida por el sistema (Electricidad, 2015).

Con respecto al sistema de prevención del fraude por impago de los pasajes, varios grupos de protección de derechos al consumidor argumentan que la Empresa Metropolitana de São Paulo no ha demostrado que la nueva tecnología de reconocimiento facial proteja la privacidad de los usuarios. Esos grupos consideran que las bases de datos utilizadas para almacenar la información generada por el sistema de vigilancia no cuentan con los mecanismos de seguridad que protegerían esta información. Adicionalmente, no ven evidencia de que la empresa Metro haya desarrollado políticas encaminadas a la protección de datos de niños y adolescentes y expresan su preocupación frente a la posibilidad de que falsos positivos tengan como consecuencia acciones discriminatorias contra los usuarios (Mari, 2020).

En octubre de 2019, el Defensor Público de São Paulo, el Defensor Público de la Unión y el Instituto Brasileño de Protección al Consumidor, entre otros, presentaron una demanda ante el Primer Tribunal de Finanzas Públicas de ese estado. En ella solicitaban al Metro de São Paulo presentar los estudios previos realizados acerca de la seguridad de los datos de los 3,7 millones de usuarios diarios, que son recopilados por el sistema de cámaras de reconocimiento facial. Así, se espera tener una evaluación acerca del impacto y los riesgos del uso de dicha tecnología en el sistema de transporte público de São Paulo (Carreño, 2020).

### **¿Cuáles han sido las principales lecciones aprendidas?**

La instalación de sistemas de videovigilancia mediante el reconocimiento facial ayuda a disminuir el fraude por el no pago de pasajes. No obstante, esta medida debe estar acompañada de políticas de seguridad y sistemas de protección de la información, que garanticen el tratamiento correcto de los datos de los usuarios, cumpliendo las normativas relacionadas con estos aspectos.

## Caracterización tecnológica de las experiencias analizadas

En el Cuadro 4.6 se categorizan las tecnologías utilizadas en las experiencias analizadas en los subapartados anteriores.

Cuadro 4.6 — Categorización de las tecnologías utilizadas en las experiencias analizadas en el sector de la movilidad

País y experiencia	Tecnologías empleadas	
	Tradicionales	Industrias 4.0
<b>Singapur</b> Digitalización del sistema de transporte público	<b>Sistemas de control</b> <b>Sistemas de monitoreo</b> <b>Sistema de recaudo</b>	<b>Big data y analítica de datos</b> <b>Nube</b>
<b>Finlandia</b> Movilidad como servicio	<b>Redes de comunicaciones móviles, infraestructura de TI</b>	<b>Big data y analítica de datos</b> <b>Internet de las cosas</b> <b>Nube</b>
<b>Suecia</b> Implementación de cargos por congestión en Estocolmo	<b>DSRC (V2I)</b> <b>ANPR</b>	<b>Big data y analítica de datos</b>
<b>Chile</b> Digitalización en la integración del sistema de transporte público de Santiago	<b>Medios de pago</b> <b>Dispositivos de validación</b> <b>Sistemas de gestión de datos</b>	<b>Big data y analítica de datos</b>
<b>Argentina</b> Análisis de movilidad a través de <i>big data</i> en la provincia de Neuquén, en la Patagonia argentina	<b>Redes de comunicaciones móviles, CDR y xRD</b>	<b>Big data y analítica de datos</b> <b>Nube</b>
<b>Brasil</b> Digitalización del Metro de São Paulo	<b>Sistemas de monitoreo</b> <b>Sistemas de gestión de datos</b>	<b>Reconocimiento facial</b> <b>Vehículos autónomos</b>

## Matriz de análisis de las experiencias estudiadas

El Cuadro 4.7 resume los principales aspectos de las experiencias estudiadas.

En general, se encuentra que todas las experiencias internacionales estudiadas son aplicables en el corto plazo en

América Latina, con excepción de la experiencia de Singapur. La excepción se debe a que en ese país se desarrolló un sistema integral para solucionar diferentes problemáticas de movilidad que podrían requerir grandes inversiones, aunque es una política que podría implementarse en el largo plazo.

Cuadro 4.7 — Matriz con los principales hallazgos de las experiencias estudiadas

Experiencia	Problema	Solución	Impacto	Barreras	Eslabón de la cadena de valor
<b>Singapur</b> Digitalización del sistema de transporte público	Alta demanda de 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 de recaudo	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Sistema de control para gestionar el flujo del tráfico y la seguridad en las vías e intersecciones a través de semáforos inteligentes y sistemas de señalización dinámica</li> <li>– Sistemas de monitoreo y vigilancia para verificar el cumplimiento de las normas de tránsito</li> <li>– Sistemas de gestión de la información para reportes del tráfico y del transporte público</li> <li>– Sistemas de recaudo para procesar las transacciones del pago de tarifas en el transporte público, los parqueaderos y peajes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Definición de los protocolos de interoperabilidad de V2I y de V2V</li> <li>– Las medidas adoptadas deben reflejarse en la experiencia del usuario para que tengan una mayor y más rápida aceptación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Usuarios de los sistemas de transporte público</li> <li>– Usuarios de los vehículos de transporte particular</li> <li>– Operadores del sistema de transporte público</li> <li>– Fabricantes de vehículos</li> <li>– Fabricantes de sistemas de control del tránsito</li> <li>– Fabricantes de sistemas de señalización del tráfico</li> </ul>
<b>Finlandia</b> Movilidad como servicio (MaaS)	Crecimiento del número de vehículos, incremento de los niveles de congestión y los índices de contaminación ambiental	Desincentivar el uso del vehículo privado mediante una aplicación de planeación del viaje a través de medios alternativos	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Aplicación para desincentivar la posesión del vehículo privado como medio de transporte</li> <li>– Integración de servicios de transporte públicos y privados, en medios individuales y colectivos</li> <li>– Planeación del viaje considerando las condiciones de tráfico y las preferencias de los usuarios</li> <li>– Gestión de la reserva y compra de tiquetes electrónicos para diferentes modos de transporte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Su implementación depende del estado de madurez de la ciudad en el ámbito social, regulatorio, tecnológico y de infraestructura de transporte</li> <li>– Se debe tener en cuenta la experiencia del usuario en el diseño de la solución</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Usuarios del sistema de transporte público</li> <li>– Operadores del sistema de transporte público</li> <li>– Usuarios de vehículos de transporte particular</li> </ul>
<b>Suecia</b> 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"> <li>– Disminución de tráfico vehicular</li> <li>– Reducción de los tiempos de viaje</li> <li>– Reducción de la huella de carbono</li> <li>– Disminución de la siniestralidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Escepticismo de los ciudadanos sobre los beneficios que traen estas medidas</li> <li>– Definición de formas a través de las cuales se realizará el pago</li> <li>– Los beneficios deben verse reflejados de forma rápida para que los ciudadanos acepten este tipo de iniciativas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Usuarios de los sistemas de transporte público</li> <li>– Usuarios de vehículos de transporte particular</li> <li>– Operadores del sistema de transporte público</li> <li>– Fabricantes de vehículos</li> <li>– Fabricantes de sistemas de control del tránsito</li> </ul>

(continúa)



Experiencia	Problema	Solución	Impacto	Barreras	Eslabón de la cadena de valor
<b>Chile</b> 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 dinero 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"> <li>- Implementación del SEPP</li> <li>- Integración e interoperabilidad de los diferentes modos de transporte</li> <li>- Establecimiento de una tarifa integral</li> <li>- Agilización del acceso a los buses y minimización del riesgo de siniestros</li> <li>- Recopilación de datos para realizar estudios de rutas origen-destino, calidad del servicio, velocidad de los buses y seguridad del medio de pago, entre otros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se debe garantizar la interoperabilidad de la tarjeta inteligente para realizar los pagos</li> <li>- Es preciso contar con un sistema de venta y recarga de tarjetas por toda la ciudad que garantice el acceso a toda la población</li> <li>- Se debe definir un esquema claro de repartición de gastos, ganancias y responsabilidades entre las distintas empresas que conforman un sistema de transporte integrado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Usuarios de los sistemas de transporte público</li> <li>- Operadores del sistema de transporte público</li> </ul>
<b>Argentina</b> Análisis de movilidad a través del <i>big data</i> en la provincia de Neuquén, en la Patagonia argentina	Elaboración de modelos de estimación de la demanda de transporte para hacer frente a altas tasas de crecimiento poblacional	Uso de herramientas de <i>big data</i> para estudiar la movilidad a partir de la información proveniente de los teléfonos móviles	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Análisis de los registros de actividad de los teléfonos móviles (huella digital)</li> <li>- Obtención de la información de la localización del usuario en el espacio y en el tiempo</li> <li>- Identificación de los periodos en los que una persona permanece en un mismo lugar y trayectos que realiza</li> <li>- Elaboración de patrones de movilidad y matrices de origen-destino, tanto totales como por franjas horarias</li> <li>- Empleo de tecnologías de uso diario (teléfonos celulares) para la construcción de modelos de movilidad en lugar de encuestas domiciliarias</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Garantizar la protección y seguridad de los datos recopilados de los usuarios</li> <li>- Regulación relacionada con el procesamiento de la información recopilada a partir de teléfonos celulares</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Usuarios de los sistemas de transporte público</li> <li>- Operadores del sistema de transporte público</li> <li>- Operadores de las redes de telecomunicaciones</li> </ul>
<b>Brasil</b> Digitalización del Metro de São Paulo	Mejorar la operación del sistema mediante la optimización de los niveles de consumo de energía y minimizar los fraudes asociados con el pago de los pasajes, entre otros aspectos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistema automático que permite la operación de los trenes sin conductor</li> <li>- Sistema de control de trenes basado en comunicaciones (CBTC)</li> <li>- Centro de control de operaciones</li> <li>- Sistema de control del acceso</li> <li>- Instalación de un sistema para el monitoreo de personas y de reconocimiento facial</li> <li>- Implementación de un proyecto de energía renovable para alimentar la operación del metro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se estima un ahorro del 30 % en los costos de la energía consumida por el sistema</li> <li>- Se espera una reducción de la criminalidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cumplimiento de la normativa sobre protección de datos personales</li> <li>- Protección de los derechos de los menores de edad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Usuarios de los sistemas de transporte público</li> <li>- Operadores del sistema de transporte público</li> </ul>

## Identificación de buenas prácticas e impacto de los incentivos regulatorios o fiscales en la promoción y el desarrollo de las distintas iniciativas

En el sector de la movilidad se evidenció la existencia de proyectos que surgen de iniciativas privadas o público-privadas que se desarrollaron sin involucrar incentivos regulatorios o fiscales. Este es el caso de las experiencias relativas a la implementación del concepto de movilidad

como servicio en Helsinki (Finlandia) y los análisis de movilidad realizados en la provincia de Neuquén en Argentina, aunque en este último caso se requería la participación de las autoridades de la región.



En cambio, la implementación de cargos de congestión exige medidas normativas. Este sistema ha sido adoptado en diferentes ciudades con el fin de hacer que los conductores paguen por las externalidades que causa el uso del automóvil particular.

En Singapur, los cargos de congestión se implementaron desde 1975 a los vehículos que quisieran circular en el área comercial central, excluyendo de su pago a los autobuses y motocicletas. La forma de cobro consistía en la compra previa de una licencia con una vigencia diaria o mensual. Este esquema estuvo en vigor hasta 1998, año en el cual se introdujeron peajes electrónicos, que permitían el cobro de cargos de congestión diferenciales dependiendo de la hora, el día, la zona geográfica y el tipo de vehículo (Federal Highway Administration, 2017).

Cualquier vehículo que viaje a través de una zona donde se apliquen cargos de congestión debe contar con una unidad vehicular interior (IU, por sus siglas en inglés), un transpondedor que tiene incorporada una tarjeta inteligente a través de la cual se controlan los saldos. Esta IU se encuentra instalada en el tablero del automóvil y dispone de pantallas y señales de audio que mantienen informado al conductor sobre los cargos deducidos y el saldo. Por su parte, los peajes operan con tecnología DSRC y cuentan con funcionalidades para identificar el estado de la IU y su clase, con el fin de reconocer el tipo de vehículo y deducir el monto del cargo correspondiente. El peaje también detecta infracciones y verifica el correcto funcionamiento de las IU, para lo cual dispone de un sistema de cámaras que capturan el número de la matrícula del vehículo.

Aunque la estructura constitucional y normativa de Singapur permitía la implementación de los cargos de congestión sin contar con la participación de los ciudadanos, las autoridades gubernamentales desarrollaron un programa de evaluación y educación por un periodo de un año antes de su implantación. Con ello buscaban un mayor entendimiento y mitigar el escepticismo inicial que generaba la medida con relación a sus beneficios. Durante el tiempo que ha operado este sistema, las autoridades han realizado mejoras sobre el uso de los recursos captados, destinando los ingresos percibidos a la ampliación del sistema de transporte público y la disminución de ciertos impuestos relacionados con la tenencia y compra de vehículos. En general, la ciudadanía ha reaccionado favorablemente a los cargos de congestión y tanto las campañas de información como la experiencia en campo han eliminado las dudas iniciales que se tenían sobre esta medida.

En Reino Unido los cargos de congestión se implementaron en 2003, aunque la iniciativa se venía trabajando desde 1964 y cubrió principalmente el distrito comercial, donde

se presentaban grandes congestiones. Los cargos son cobrados mediante un sistema de cámaras que identifican las placas de los vehículos. Los pagos se realizan a través de un sitio web, mensajes de texto SMS, en tiendas equipadas con PayPoint o por teléfono. Los pagos se deben realizar el mismo día o, de no hacerlo, da lugar a multas cuyo valor aumenta con el paso del tiempo.

En el momento de aplicar la medida, los londinenses consideraban que el tráfico en la ciudad había alcanzado niveles inaceptables y sentían la necesidad de adoptar una disposición radical que revirtiera esta situación. Otros factores que favorecieron su implementación y aceptación por parte de los ciudadanos fueron la popularidad del alcalde que gobernaba la ciudad en 2003 y el hecho de que fue puesta en marcha al inicio de su mandato.

Por último, en Estocolmo los cargos de congestión se implantaron de forma permanente en 2007. Los factores que favorecieron su aprobación por parte de la ciudadanía están asociados con el previo desarrollo de un plan piloto, cuyo resultado evidenció los beneficios de la medida, pese a que la percepción general captada por encuestas anteriores a su puesta en marcha mostraba una oposición mayoritaria al proyecto.

Con respecto a los impactos generados por esta medida regulatoria, en estas tres ciudades se evidenció una reducción del número de automóviles que entraban a las zonas de cobro del cargo de congestión y un aumento en las velocidades vehiculares.

Las inversiones realizadas en Singapur para implementar el sistema, que operó entre 1975 y 1998, ascendieron a SGD 500.000 y los costos operativos a SGD 600.000 durante todo el tiempo de funcionamiento. Por su parte, los ingresos anuales estimados durante el periodo de operación fueron de aproximadamente SGD 6,8 millones. Por lo tanto, los ingresos fueron equivalentes a once veces los costos. Para el sistema que operó desde 1998, se realizaron inversiones del orden de SGD 200 millones, de los cuales aproximadamente SGD 100 millones se destinaron a la compra e instalación de alrededor de 1,1 millones de IU. Además, se estiman ingresos diarios del orden de SGD 600.000, lo que sugiere ingresos anuales de más de SGD 150 millones.

En Reino Unido, de acuerdo con un estudio realizado en 2007, los costes iniciales del establecimiento del sistema fueron del orden de GBP 161,7 millones. Por su parte, los ingresos netos variaron en un rango de entre GBP 50 millones y GBP 89 millones, recursos que se destinaron a financiar el sistema de transporte en Londres en cumplimiento de la normatividad establecida.

La inversión de capital del sistema de cargos de congestión en Estocolmo fue del orden de SEK 3.000 millones y los costos operativos anuales se estimaron en SEK 220 millones. Además, se calcula que los ingresos anuales ascendieron a SEK 760 millones. Estos datos sugieren que el período de recuperación de las inversiones es de aproximadamente 5 años.

Con respecto a los impactos ambientales en las tres ciudades, se evidenciaron mejoras en la calidad del aire, con reducciones en la huella de carbono.

Otro de los proyectos analizados y que requiere incentivos normativos y fiscales es la implementación del sistema de transporte integrado multimodal en Santiago de Chile. Este sistema fue concebido en el año 2000 y presentado en el documento “Política y Plan de Transporte Urbano para Santiago 2000-2010” (Comité Asesor del Ministro de Obras Públicas, Transportes y Telecomunicaciones, 2000), el cual permitió la integración e interoperabilidad de diferentes modos de transporte, así como la definición de una tarifa unificada, posibilitando hasta dos trasbordos en un periodo de dos horas. La adopción de una tarjeta como medio de

pago para acceder al sistema evitó que los conductores recibieran dinero en efectivo por los pasajes. Las medidas trajeron eficiencias al reducir los tiempos de abordaje y mitigar los riesgos de siniestros de tráfico.

La implementación de este sistema ha requerido de la promulgación de diversas normas legales, tales como la Ley 18.772 de 1989, a través de la cual se creó la sociedad anónima METRO S.A. Además, se han adoptado diversas leyes, decretos y resoluciones mediante las cuales se concesiona la prestación del servicio público de transporte urbano remunerado (Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, 2013) y se crean subsidios para acceder a dicho sistema (Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, 2020).

Por último, la experiencia de Neuquén en Argentina muestra cómo, a través del teléfono celular, es posible la elaboración de matrices de origen-destino que permiten establecer los flujos de tráfico de personas. Esto posibilita una planeación más eficiente de los sistemas de transporte público, que responda a las necesidades e intereses de los ciudadanos.

## Caracterización del uso de las tecnologías digitales en el sector de la movilidad

### Tecnologías digitales para el diseño y la gestión de la infraestructura y los activos del sector

La digitalización de los sistemas de transporte público requiere de un conjunto de elementos tecnológicos que soporten los sistemas de información, las redes de telecomunicaciones y los demás dispositivos a través de los cuales se realizará el control y monitoreo de la flota y el recaudo de los ingresos mediante diferentes medios de pago. Además, los registros de llamada de los teléfonos móviles, las sesiones de conexión de los dispositivos inteligentes a las redes wifi públicas y la información generada por las tarjetas inteligentes (*smart cards*) usadas para el pago del transporte público permiten observar y analizar los comportamientos de desplazamiento de las personas. Todo ello facilita la elaboración de modelos de demanda que apoyan el diseño de rutas y mejoran la eficiencia del transporte público.

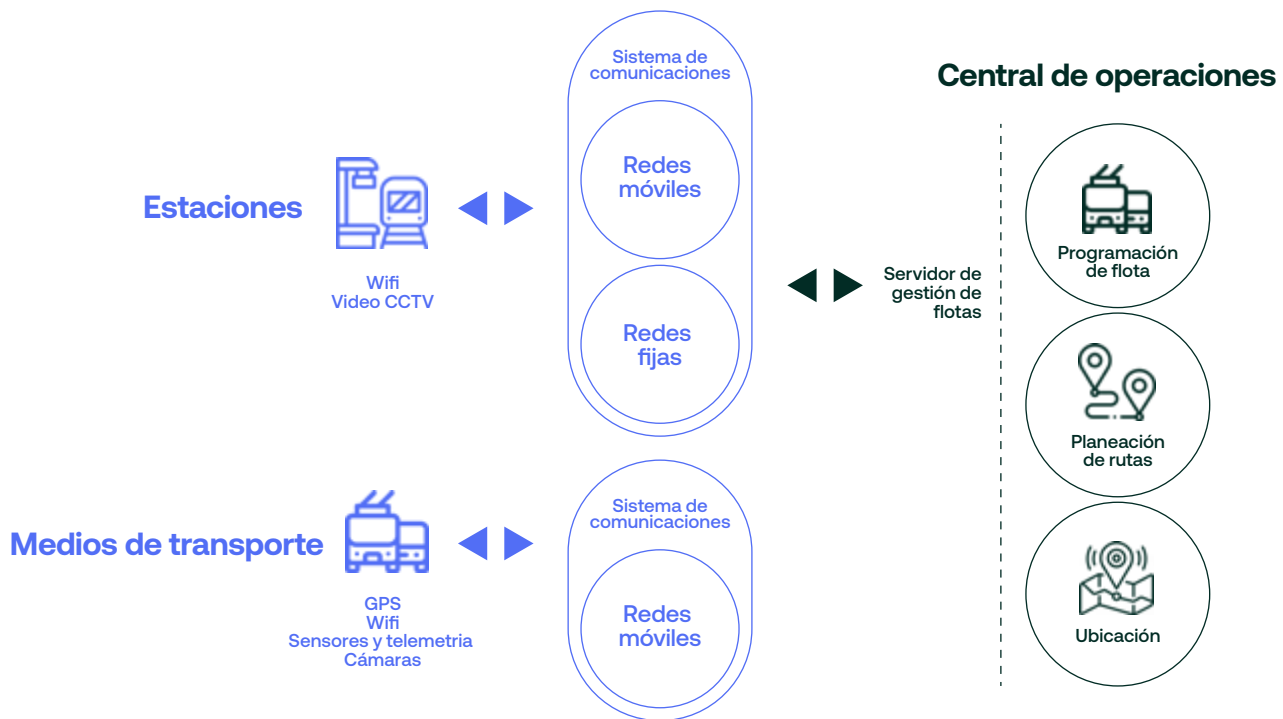
Conceptualmente, la implementación de estas funcionalidades requiere la integración de cuatro subsistemas, los cuales se presentan de forma esquemática en la Figura 4.4.

- 1 **Subsistema de control de la flota.** De acuerdo con la norma ISO 14813-1 (ISO, 2015) este subsistema está conformado por las siguientes funciones: i) gestión de la operación del sistema de transporte público, el cual involucra la programación de los itinerarios y rutas de los vehículos y la coordinación de respuestas frente a la materialización de riesgos durante la operación del sistema; ii) gestión de la flota, que se encarga de realizar el control del flujo de los vehículos con el fin de satisfacer las necesidades de los usuarios; iii) monitorización del desempeño de los modos de transporte, donde se verifica su funcionamiento, se evalúa la conducción de los operarios y el estado y el comportamiento de los

pasajeros dentro de los vehículos; iv) monitorización de la operación, que permite establecer en tiempo real el estado de las rutas, las demoras o los adelantos de los vehículos y la ocupación del sistema.

Para llevar a cabo estas funcionalidades, se necesitan dispositivos y sistemas de georreferenciación, telemetría, cámaras de video, equipos de comunicaciones de voz y sistemas de procesamiento de *big data* capaces de analizar la información recopilada

Figura 4.4 — Diagrama esquemático del subsistema de control de la flota



**2 Subsistema de recaudo.** Este subsistema está conformado por los elementos que recolectan la información requerida para la gestión y control de los mecanismos y procesos a través de los cuales los usuarios acceden al sistema de transporte público.

Los elementos que integran este subsistema son los siguientes:

- Los puntos de recarga o recaudo de las tarjetas utilizadas por los usuarios para acceder al sistema de transporte público.
- El centro de gestión de recargas y recaudos, donde se procesan las transacciones, se realizan las liquidaciones y se calculan los saldos.
- Las compañías de transporte de valores que trasladan el dinero recaudado.
- El sistema financiero, si el sistema acepta como medio de pago las tarjetas emitidas por entidades bancarias.
- El taller de mantenimiento, que se encarga de ejecutar los procesos de reparación y demás actividades que garantizan la continuidad de la operación del subsistema de recarga o recaudo.

Figura 4.5 — Diagrama esquemático del subsistema de recarga o recaudo

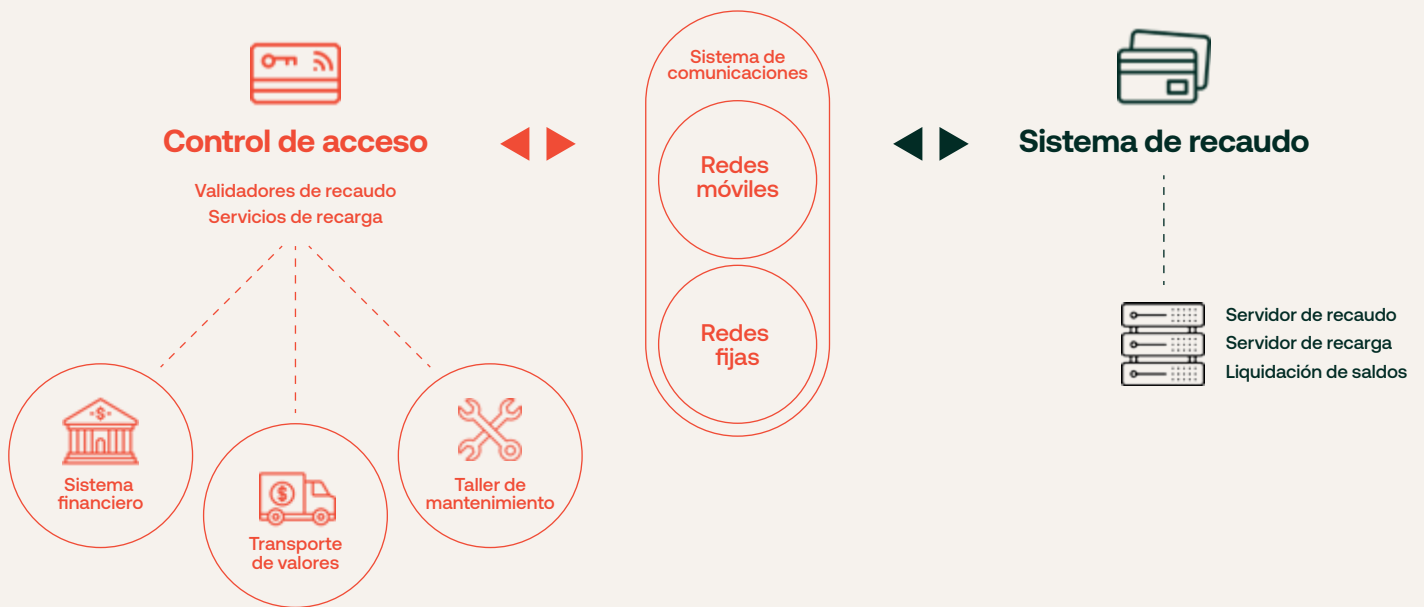


Figura 4.6 — Diagrama esquemático del subsistema de información y servicio al usuario



**3 Subsistema de información y servicio al usuario.** Los usuarios pueden acceder a la información del sistema de transporte público a través de cuatro medios: i) pantallas o altavoces ubicados dentro de las estaciones y los vehículos que conforman el sistema; ii) aplicaciones instaladas en dispositivos móviles; iii) portal web para consultas a través del internet; y iv) centro de llamadas (*call center*), donde se atiende a los usuarios mediante contacto telefónico, robot-chats y redes sociales.

La información disponible es la siguiente: i) estación donde se encuentran ubicados; ii) tiempo estimado de la llegada de los vehículos; iii) ruta tomada; iv) paradas que realizará la ruta; v) destino final de la ruta; y vi) tiempo estimado de llegada al destino del usuario.

**4 Subsistema de big data.** A través de este subsistema, se analizan los datos recopilados por todos los subsistemas para realizar inteligencia empresarial (*business intelligence*). Su finalidad es tomar decisiones en tiempo real e interactuar con los usuarios del sistema de transporte. Este subsistema también se encargará de anonimizar la información con el fin de cumplir la legislación relativa a la protección de datos de los ciudadanos.

Para su operación se requieren servidores y computadores de gran desempeño, con altas capacidades de procesamiento y almacenamiento. Estos aparatos ejecutan los programas que permiten almacenar, gestionar y analizar la gran cantidad de datos generados por los otros subsistemas y soportar la toma de decisiones en tiempo real. Además, se necesita la implementación de sistemas de gestión de la seguridad de la información que garanticen la integridad, disponibilidad y confiabilidad de los datos almacenados.

Figura 4.7 — Diagrama esquemático del subsistema de *big data* e inteligencia artificial

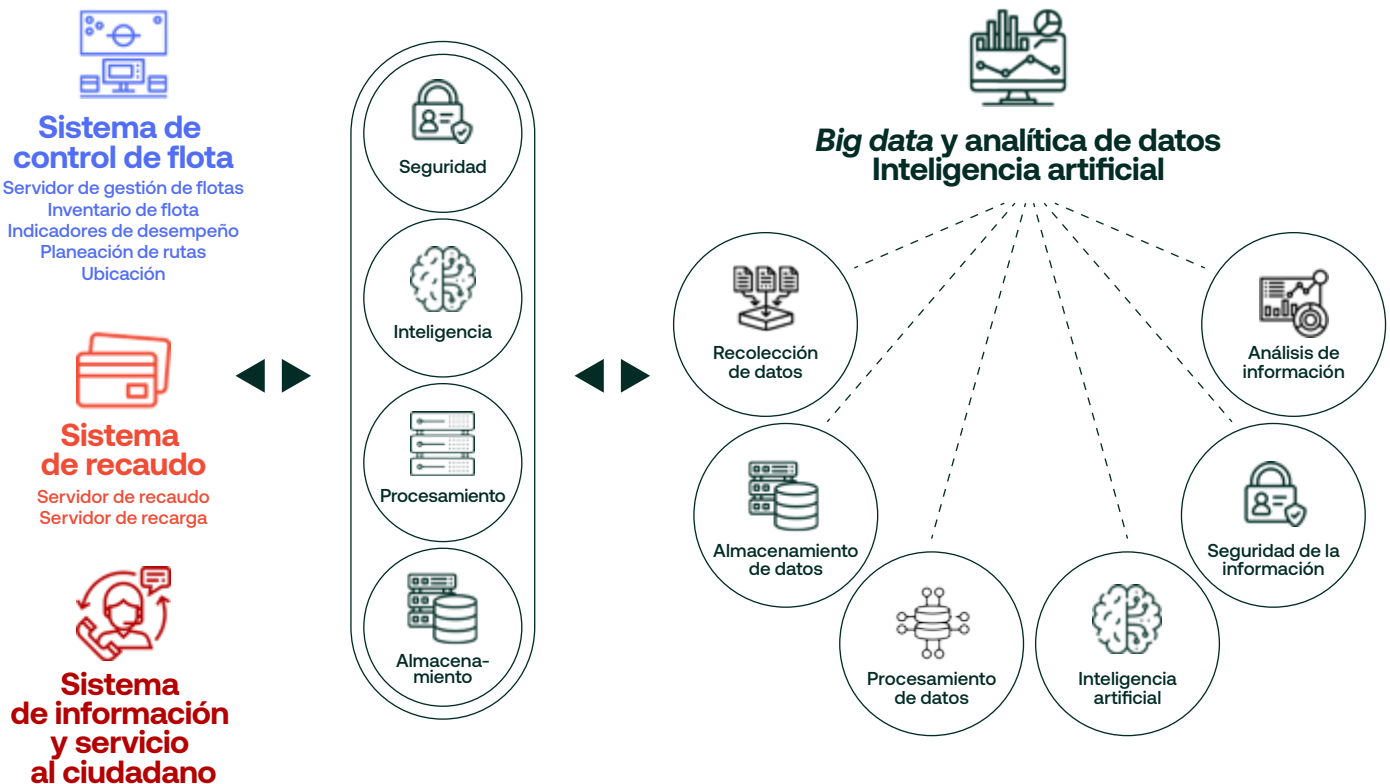


Figura 4.8 — Esquema general de los subsistemas requeridos para la digitalización del transporte público

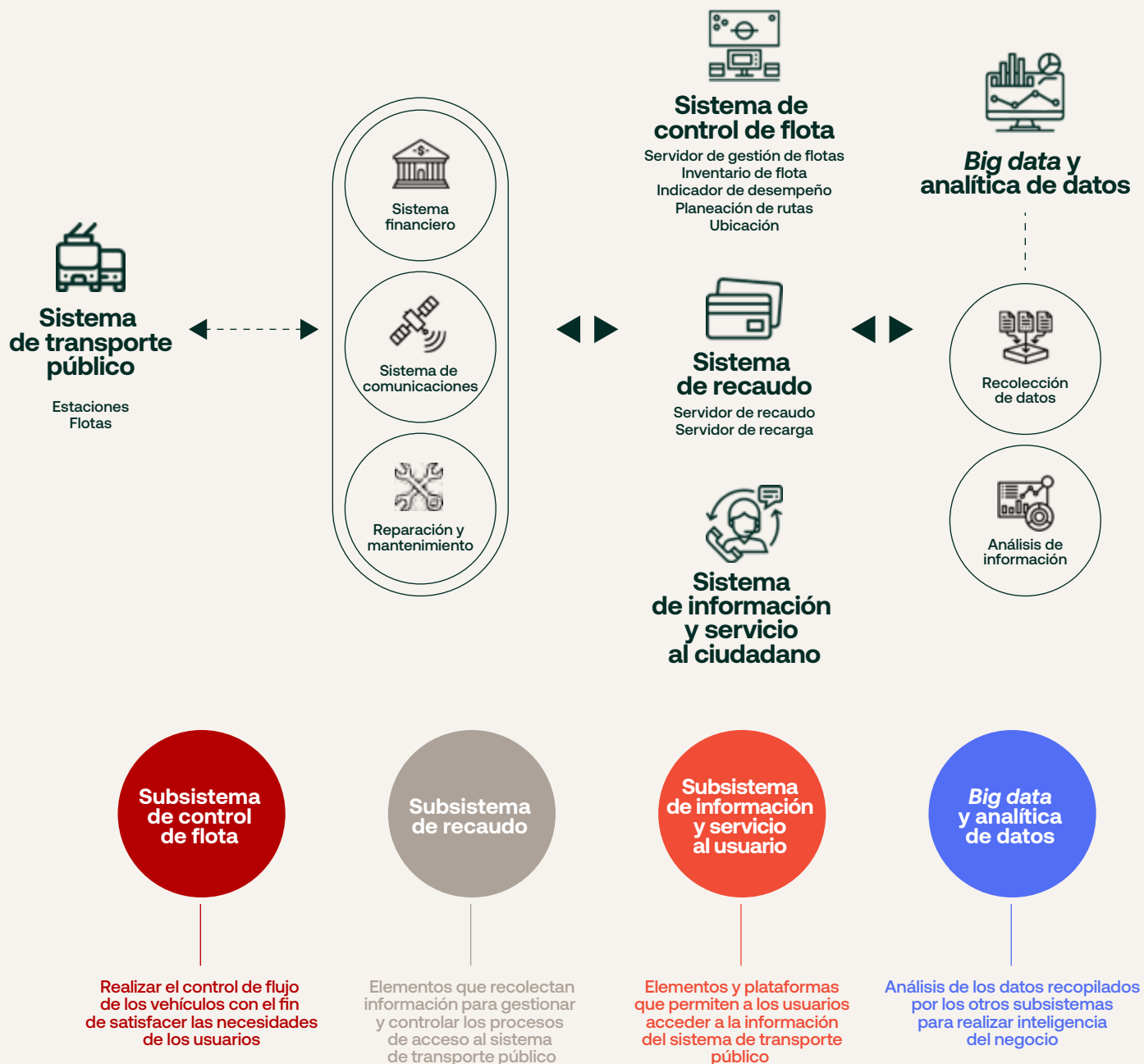
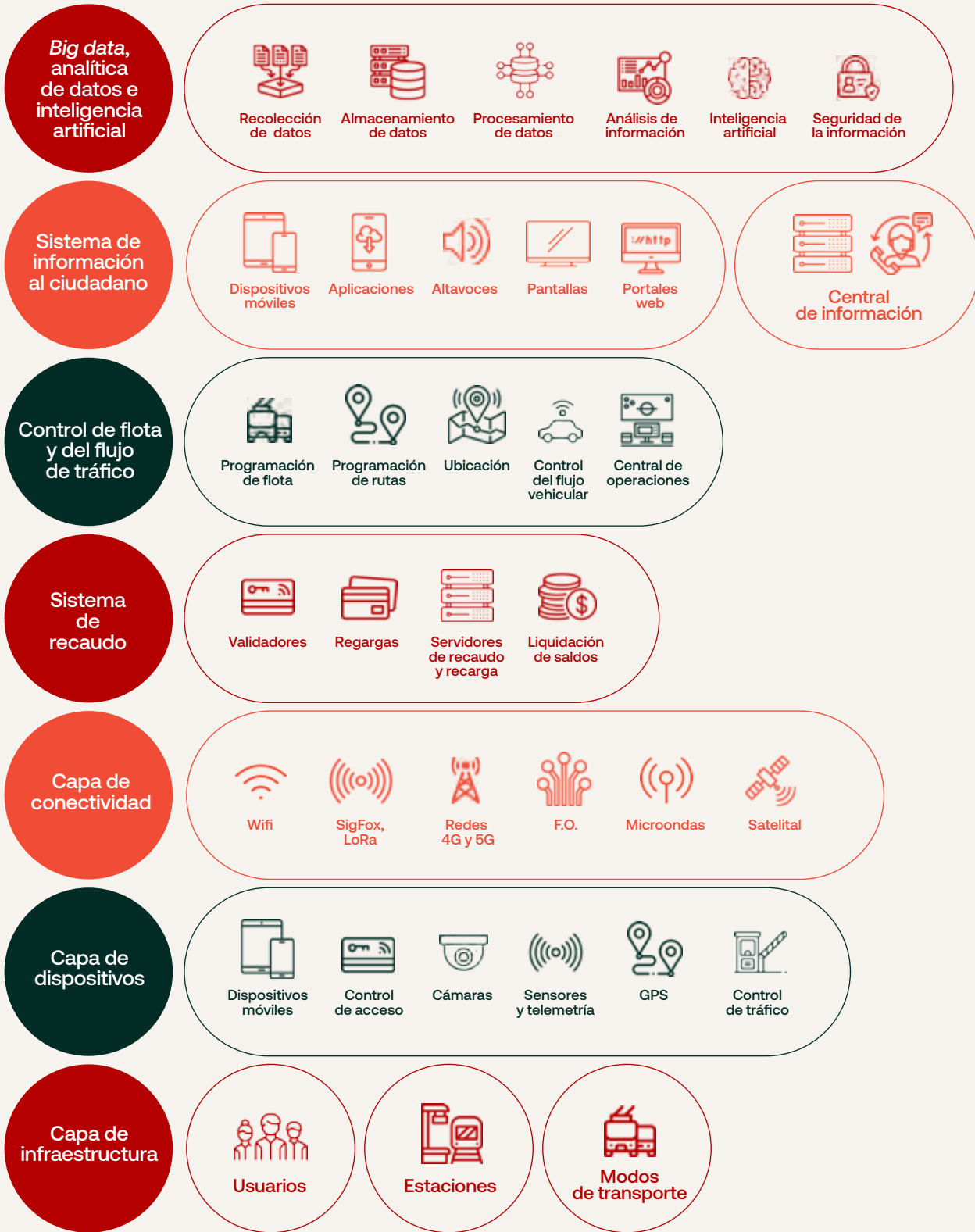


Figura 4.9 — Esquemas y tecnologías digitales aplicados a las infraestructuras y los activos del sector de transporte



## Tecnologías digitales aplicadas a las infraestructuras y los activos considerando las capas de los dispositivos o sensores, la recolección y el procesamiento de datos y sus aplicaciones

De manera esquemática, el desarrollo e implementación de infraestructuras digitales en el sector de la movilidad comprende siete capas:

- 1 Capa de infraestructura.** Está conformada por los usuarios, las estaciones del servicio público y los diferentes modos de transporte que pueden utilizar los ciudadanos para trasladarse de un lugar a otro, tales como el metro, los autobuses, los automóviles, las motocicletas y las bicicletas.
- 2 Capa de dispositivos.** Corresponde a los elementos a través de los cuales se recopila la información sobre la operación y funcionamiento del sistema de transporte que permite los desplazamientos de los ciudadanos. Está compuesta por los dispositivos móviles (celulares, tabletas, portátiles, etc.) de los usuarios que transitan por las carreteras utilizando diferentes modos de transporte públicos o privados, los sistemas de control de acceso para utilizar el transporte público y las cámaras instaladas para observar el comportamiento del sistema de transporte y de los usuarios. También incluye los sensores, componentes de telemetría y dispositivos GPS que posibilitan ubicar y monitorear el flujo del tráfico vehicular y de otros modos de transporte, así como los sistemas de control del tráfico, tales como semáforos y peajes, que permiten la implementación de cargos de congestión o contaminación para desestimular el uso de automóviles particulares.
- 3 Capa de conectividad.** Está conformada por las redes y tecnologías de comunicación que transmiten la información entre las siguientes capas que conforman la arquitectura del sistema de transporte: i) dispositivos; ii) sistema de recaudo; iii) control de la flota y del flujo del tráfico; iv) sistema de información al ciudadano; y v) *big data*, analítica de datos e inteligencia artificial.
- 4 Sistema de recaudo.** Compuesto por los diferentes elementos que controlan el acceso al sistema de transporte público, tales como tarjetas y otros medios de pago, puntos de acceso, sitios de recarga de pasajes, los servidores que administran y gestionan el recaudo y las recargas para el acceso al sistema y los que permiten la liquidación de saldos. Pueden incluir interfaces con el sistema financiero si se aceptan pagos con tarjetas emitidas por entidades bancarias.
- 5 Control de la flota y del flujo del tráfico.** A partir de la información recopilada a través de las cámaras, los sensores y los dispositivos de telemetría y GPS, se monitoriza el comportamiento del sistema de transporte, permitiendo la programación de rutas y la salida de vehículos de transporte público. También se supervisa el comportamiento de los usuarios que utilizan el servicio público y el flujo vehicular de las vías públicas, lo cual permite definir y establecer estrategias para mejorar la eficiencia del sistema de transporte.
- 6 Sistema de información al ciudadano.** Lo componen los elementos y la infraestructura a través de los cuales los ciudadanos acceden a la información del sistema de transporte. Además de la información sobre el servicio de transporte público, se puede compartir información sobre el estado de las rutas, los incidentes ocurridos en las vías y la estimación de los tiempos de viaje, entre otros tipos de información.
- 7 Big data, análisis de datos e inteligencia artificial.** Está compuesto por los elementos que permiten recopilar, almacenar, procesar y analizar los datos recopilados a través de los diferentes elementos de la capa de dispositivos

## Tecnologías digitales para la desintegración de procesos y la obtención de eficiencias

Como se muestra en la Figura 4.9, la información recopilada por los diferentes elementos de la capa de dispositivos (celulares, cámaras de video, GPS, etc.) puede ser utilizada para determinar el estado de las vías, planificar los viajes, gestionar el flujo del tráfico o mostrar eventos de tráfico en

los sistemas de información geográfica (SIG). Esa tecnología ofrece la oportunidad de mejorar la eficiencia de los sistemas de transporte al suministrar información útil para la planificación y gestión de las vías, así como para la toma de decisiones de los usuarios.



Para que esta información sea de utilidad, tanto para los usuarios como para los administradores del sistema de transporte, se deben incorporar técnicas de almacenamiento y procesamiento avanzadas, tales como el *big data*, la analítica de datos y la inteligencia artificial. Los resultados de ese procesamiento permiten una toma de decisiones fundamentada en datos en tiempo real.

El desarrollo e implementación de estas tecnologías hacen posible monitorear, controlar y optimizar la operación de los sistemas de transporte público y el flujo del tráfico. Esto es así porque ayudan a las autoridades a decidir sobre la gestión de la movilidad y suministran a los usuarios información sobre las condiciones de este sistema y de las vías, lo que contribuye a mejorar los tiempos de desplazamiento y el flujo vehicular sobre las carreteras. Igualmente, posibilitan la implementación de medidas, como, por ejemplo, los cargos de congestión o contaminación, y el desarrollo de aplicaciones con las que los usuarios pueden conocer las rutas y los modos de transporte que minimizan los tiempos de viaje. Además, incentivan el uso del transporte público masivo y otros modos alternativos (por ejemplo, las bicicletas y patinetas eléctricas), lo que trae

## Valor agregado y potencial de desarrollo de nuevos servicios

El desarrollo y la masificación de tecnologías que facilitan la digitalización en este sector promueven la creación de sistemas de transporte inteligentes (STI). Estos incentivan la implementación de nuevos proyectos e iniciativas encaminadas a mejorar el funcionamiento y la operación de dicho sistema.

Actualmente existen dos vertientes de digitalización de los STI. Por una parte, se encuentran aplicaciones y servicios maduros, como es el caso de los sistemas automáticos de gestión del tráfico y los servicios de información del transporte público. Por otra parte, están tecnologías aún en etapa experimental, como los vehículos autónomos y servicios asociados con la implantación de tecnologías que permiten la conexión de los vehículos con otros vehículos (V2V) o con la infraestructura (V2I) (Perallos et al., 2016).

Mediante los sistemas de gestión del tráfico que utilizan tecnología de geolocalización, los usuarios pueden conocer el estado del flujo vehicular, los incidentes ocurridos en las vías y los niveles de congestión de los corredores viales. La integración de estos sistemas con sistemas de información meteorológica reduce los riesgos de siniestros gracias al envío de alertas a los conductores y la toma de acciones preventivas por parte de las autoridades frente a situaciones meteorológicas extremas. Estos sistemas también permiten

eficiencias en los consumos energéticos y la disminución de la huella de carbono.

El despliegue y uso de sensores y cámaras mejora las condiciones de seguridad de los sistemas de transporte, permitiendo la generación de alertas a sus usuarios, orientadas a la prevención de siniestros. También ofrece la posibilidad de mejorar los tiempos de identificación de incidentes en las vías y facilitar el reporte de emergencias, acciones que contribuyen a mejorar la seguridad de las carreteras y, consecuentemente, a salvaguardar la vida de las personas. Estos elementos también habilitan la implementación de sistemas de monitoreo y vigilancia, a través de los cuales se identifican posibles violaciones a las normas de tránsito y se emiten las sanciones correspondientes a los infractores.

Por su parte, tanto los sistemas de control de flota como los sistemas de recaudo en el transporte público permiten optimizar la operación del sistema de transporte público. De esta forma, se mejora la frecuencia de las rutas al facilitar su programación en función de la demanda y agilizar los tiempos de abordaje, con lo cual disminuyen los costos de operación del sistema.

mejorar los sistemas de control de los semáforos, incorporando instrumentos automáticos de toma de decisiones que dan mayor flexibilidad a la operación de estos elementos al permitir que su funcionamiento se adapte según sean las condiciones de tráfico en la vía. Además, posibilitan modificaciones al comportamiento normal de los semáforos cuando se identifique la circulación de ciertos tipos de vehículos de paso prioritario, como ambulancias o sistemas masivos de transporte.

El flujo del tráfico en las carreteras interurbanas mejora con la implementación de peajes electrónicos que ofrecen la posibilidad de realizar el pago mientras se circula, sin la necesidad de realizar paradas.

Los sistemas de control de la flota del transporte público integrados con los sistemas de información a los usuarios permiten a estos conocer el tiempo para la llegada del próximo vehículo.

La implementación de sistemas inteligentes de recaudo en el servicio de transporte público, junto con el uso de cámaras de reconocimiento facial, mitiga los fraudes asociados con el no pago del billete al permitir un control más efectivo de la entrada y salida de pasajeros y la identificación de aquellos usuarios que entraron fraudulentamente al sistema.

Por otra parte, el desarrollo y la implementación de tecnologías de DSRC permiten a los vehículos transmitir información relativa a su posición, dirección, velocidad y otros datos de interés a los otros vehículos que se encuentran a su alrededor y a sistemas de control del tráfico y de información situados sobre las vías. Estos avances promoverán el desarrollo de aplicaciones que se aprovechan de la conexión V2V y V2I, tales como:

- Aplicaciones de prevención de siniestros, cuyo objetivo es mejorar la seguridad mediante sistemas de alerta a los conductores o incluso pudiendo intervenir en el control de los vehículos.
- Aplicaciones y tecnologías de conducción automática. Son sistemas de *hardware* y *software* que introducen funciones de conducción automática cuyo objetivo es mitigar los efectos de los errores humanos mediante el uso de tecnologías V2V y V2I y sensores para la detección de obstáculos.

— Aplicaciones para el manejo de emergencias, alertas de tráfico, seguridad vial y prevención de incidentes. Consiste en la implementación de plataformas de doble vía con las que se pueden generar diferentes tipos de alertas para la toma de decisiones a partir de la información proporcionada por otros vehículos (V2V) y los sistemas instalados en la infraestructura vial, como los sistemas de emergencia, los sensores que miden el estado de la carretera, etc. (V2I).

Es importante notar que los beneficios que acarrearán estos desarrollos estarán en función de la masificación y adopción de las tecnologías de comunicación V2V y V2I.

En el Cuadro 4.8 se presenta un resumen con las tecnologías, los nuevos negocios y servicios que permitirá su implementación, así como los incentivos que impulsarán la digitalización del sector de la movilidad.

**Cuadro 4.8 — Tecnología, nuevos negocios y servicios que promoverán la digitalización del sector de la movilidad**

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

# Identificación de los costos de la digitalización del sector de la movilidad

Para cada una de las capas presentadas en la Figura 4.9, se pueden identificar equipos y aplicaciones descritos en el apartado anterior que determinan los costos incrementales de CAPEX y OPEX que conlleva la digitalización de la infraestructura y los activos funcionales del sector de la movilidad. Estos costos incrementales se establecen a partir de los componentes de digitalización y las funcionalidades que se implementarán en las infraestructuras. Los diseños técnicos y trabajos de ingeniería detallados permiten determinar los costos y cronogramas de implementación requeridos para cumplir con los objetivos y las proyecciones de demanda

del proyecto. Los costos detallados de los equipos o aplicaciones específicos a utilizar en un proyecto dependen de múltiples variables, desde las especificaciones técnicas detalladas hasta la selección del fabricante, pasando por factores que influyen los precios, como el país donde se implementa y las economías de escala y alcance del proyecto. Considerando lo anterior, en el Cuadro 4.9 se identifican los equipos, aplicaciones, funcionalidades y principales factores que determinan el costo de los diferentes componentes en cada una de las capas de los proyectos en el sector de la movilidad.

**Cuadro 4.9 — Equipos, aplicaciones, funcionalidades y determinantes de los costos (CAPEX y OPEX) para la digitalización de los proyectos de infraestructura del sector de la movilidad**

Equipo o aplicación	Funcionalidades	Determinantes de costos
<b>Capa de dispositivos</b>		
Sensores (en carreteras, estaciones de transporte público)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Generación de información para alertar a los conductores sobre el estado de las vías</li> <li>– Comunicación V2I y V2V</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Tipo de sensores</li> <li>– Proximidad (V2V o V2I)</li> <li>– Pago de peajes o cargos de congestión o contaminación (V2I)</li> </ul>
Sensores vehiculares (buses, vagones de metro o de tren, GPS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Monitoreo del flujo vehicular</li> <li>– Introducción de funciones de conducción automática</li> <li>– Introducción de funciones para el cobro de cargos por el uso de las vías</li> <li>– Generación de alertas para la prevención de siniestros</li> <li>– Ubicación y monitoreo de los vehículos</li> <li>– Comunicación con sistemas de información geográfica (SIG)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Soporte para la conducción autónoma (V2V o V2I)</li> <li>– Estado de la carretera (mojada, seca, etc.)</li> <li>– Parque vehicular de transporte público que contará con sensores V2V o V2I.</li> <li>– Parque vehicular particular que contará con sensores V2V o V2I</li> <li>– Tecnología a través de la cual operarán los sensores V2V o V2I</li> <li>– Vías donde se implementarán los sistemas V2I</li> <li>– Cantidad estimada de sensores por tipo que se instalarán por vía</li> <li>– Costo del transporte, instalación y obra civil requerida</li> <li>– Cantidad de semáforos e intersecciones donde se implementarán los sistemas V2I</li> <li>– Funcionalidades y especificaciones de los sensores</li> </ul>
Sistemas de cobro electrónico por el uso de vías y peajes electrónicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cobro de cargos por el uso de las vías</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Número de puntos en las vías donde se aplicarán cargos de congestión o contaminación</li> <li>– Número de puntos en zonas donde se implementarán sistemas de cobro electrónico por el uso de las vías</li> <li>– Cantidad de peajes electrónicos que se instalarán en las vías</li> <li>– Flujo máximo estimado de vehículos que transitarán por la zona donde se cobrarán cargos de congestión o contaminación en un periodo de tiempo determinado</li> <li>– Tecnología utilizada para el cobro de cargos de congestión o contaminación y peajes electrónicos</li> </ul>

(continúa)

Equipo o aplicación	Funcionalidades	Determinantes de costos
Sistemas de reconocimiento automático del número de matrícula (ANPR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificación de las placas de los vehículos</li> <li>- Cobro de cargos por el uso de las vías</li> <li>- Imposición de multas a infractores</li> <li>- Control de la salida y llegada de vehículos de transporte público</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cantidad de sitios donde se instalarán sistemas de DSRC: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Intersecciones viales</li> <li>• Vías con control de velocidad</li> <li>• Espacios públicos para la prevención e imposición de multas</li> <li>• Peajes y zonas donde se aplicarán cargos de congestión o contaminación que utilicen tecnología ANPR</li> <li>• Otros lugares donde se implementarán tecnologías ANPR</li> </ul> </li> <li>- Características técnicas de los sistemas ANPR</li> <li>- Costos del transporte, instalación y obra civil</li> </ul>
Dispositivos dedicados de comunicaciones (DSRC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cobro de cargos por el uso de las vías</li> <li>- Introducción de funciones que permitirán conocer información relativa a la posición, dirección, velocidad y otros datos de interés de los vehículos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Número de puntos (peajes, otro tipo de infraestructura urbana) donde se utilizará tecnología de DSRC</li> <li>- Características técnicas de los sistemas de DSRC</li> <li>- Costos del transporte, instalación y obra civil</li> </ul>
Semáforos inteligentes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Detección automática de vehículos y peatones, que ajusta la duración de los estados del semáforo</li> <li>- Cambios de estado para priorizar la circulación de ambulancias y vehículos de organismos encargados de garantizar la seguridad o de atención de emergencias</li> <li>- Cambios de estado para priorizar la circulación de sistemas de transporte masivo</li> <li>- Sistemas de alerta para proteger la vida de los peatones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cantidad de intersecciones donde se instalarán los semáforos inteligentes</li> <li>- Cantidad de semáforos requeridos por intersección</li> <li>- Tecnologías a través de las cuales operarán los semáforos inteligentes</li> <li>- Funcionalidades incorporadas por los semáforos inteligentes</li> </ul>
Señalización dinámica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cambios en la señalización para priorizar la circulación de ambulancias y vehículos encargados de garantizar la seguridad o de atención de emergencias</li> <li>- Cambios en la señalización para priorizar la circulación de sistemas de transporte masivo</li> <li>- Cambios en la señalización para informar o prevenir incidentes en la vía</li> <li>- Cambios en la señalización para modificar los límites de velocidad de acuerdo con las condiciones viales y de tráfico vehicular</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Características técnicas de las señales de tránsito dinámicas</li> <li>- Cantidad estimada de señales de tránsito dinámicas que se instalarán por vía</li> <li>- Tecnologías a través de las cuales operarán las señales de tránsito dinámicas</li> <li>- Funcionalidades incorporadas por las señales de tránsito dinámicas</li> </ul>
Cámaras de video (CCTV)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vigilancia en los sistemas de transporte público (estaciones, buses y paraderos)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Número de estaciones y paraderos de transporte público</li> <li>- Parque automotor del sistema de transporte público y número de cámaras por tipo de vehículo</li> <li>- Número de emplazamientos con monitoreo remoto</li> <li>- Características de las cámaras</li> </ul>
<b>Capa de conectividad</b>		
<b>Redes propias</b>		
Estaciones base	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Redes y protocolos de comunicaciones a través de las cuales se transmite la información entre las diferentes capas que conforman la arquitectura del sistema de movilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Áreas geográficas que deberán cubrir las redes</li> <li>- Tecnologías utilizadas</li> <li>- Estaciones de transporte público</li> <li>- Paraderos del sistema de transporte público</li> <li>- Puntos de recarga y recaudo</li> <li>- Otras ubicaciones con dispositivos que requieran transmitir información</li> <li>- Periodicidad de transmisión de la información</li> <li>- Volumen de datos generados por los dispositivos desplegados</li> <li>- Servicios que prestarán a través de las redes desplegadas (voz o datos)</li> <li>- Ancho de banda requerido para la transmisión de servicios de voz o datos</li> <li>- Bandas de frecuencia de espectro radioeléctrico utilizadas (libres o licenciadas)</li> <li>- Niveles de calidad y servicios requeridos</li> <li>- Costos del transporte, instalación y obra civil</li> </ul>
Fibra óptica		
Enlaces microondas		
Enlaces satelitales		
Otros equipos de comunicaciones		

(continúa)

Equipo o aplicación	Funcionalidades	Determinantes de costos
<b>Redes de terceros</b>		
Contratación de servicios de telecomunicaciones (voz o datos, canales dedicados u otros)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Servicios contratados de telecomunicaciones para transportar las señales desde los dispositivos de medición y control hasta los centros de monitoreo y control de la movilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Áreas geográficas donde se requerirá la prestación de los servicios</li> <li>- Estaciones de transporte público</li> <li>- Paraderos del sistema de transporte público</li> <li>- Puntos de recarga y recaudo</li> </ul>
Arrendamiento de infraestructura	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Arrendamiento de infraestructura de terceros para la instalación o despliegue de equipos que transportan las señales desde los dispositivos hasta los centros de monitoreo y control de la movilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Otras ubicaciones con dispositivos que requieran transmitir información</li> <li>- Servicios que se contratarán (voz o datos)</li> <li>- Volumen de datos generado por los servicios contratados</li> <li>- Niveles de calidad y servicios requeridos</li> <li>- Costo mensual por el tipo de enlace según el volumen de datos de los servicios contratados</li> <li>- Cantidad y elementos de infraestructura que se arrendarán (torres, postes, espacio físico, etc.)</li> <li>- Tarifas de arrendamiento (torres, espacios físicos, etc.)</li> </ul>
<b>Capa de control de flota y flujo de tráfico<sup>a</sup></b>		
<i>Software</i> de control de flota	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Programación de la flota</li> <li>- Programación de las rutas</li> <li>- Ubicación de cada elemento de la flota</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Número y tipo de elementos que componen la flota de transporte público (buses, vagones)</li> <li>- Estaciones de transporte público</li> <li>- Paraderos del sistema de transporte público</li> <li>- Periodicidad de transmisión de la información</li> <li>- Volumen de datos generados por los dispositivos desplegados</li> </ul>
<i>Software</i> y aplicaciones de control de tráfico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Control del flujo vehicular</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cantidad de intersecciones donde se instalarán los semáforos o señales de tránsito inteligentes</li> <li>- Cantidad de semáforos o señales de tránsito inteligentes requeridos por intersección</li> <li>- Funcionalidades incorporadas por los semáforos o señales de tránsito inteligentes</li> <li>- Periodicidad de transmisión de la información</li> <li>- Volumen de datos generados por los dispositivos desplegados</li> </ul>
<b>Capa de recaudo</b>		
Torniquetes automáticos de acceso	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Control de acceso al sistema de transporte público (autenticación y control de la entrada y salida de usuarios)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Número de estaciones de transporte público</li> <li>- Número de paraderos del sistema de transporte público</li> <li>- Parque automotor del transporte público</li> </ul>
Elementos de recaudo para diferentes medios de pago	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Validación de medios utilizados por los usuarios para acceder al sistema de transporte público</li> <li>- Recaudo de los pagos realizados por los usuarios para acceder al sistema de transporte público</li> <li>- Recargas a los medios de pago para el acceso al sistema de transporte público</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estaciones de transporte público</li> <li>- Paraderos del sistema de transporte público</li> <li>- Población estimada que hará uso del servicio de transporte público por estación o paradero</li> <li>- Parque automotor del sistema de transporte público</li> <li>- Cantidad de puntos de recarga y recaudo</li> <li>- Medios de pago habilitados</li> </ul>

(continúa)

## Equipo o aplicación    Funcionalidades

## Determinantes de costos

### Sistema de información al ciudadano

Pantallas	<ul style="list-style-type: none"><li>– Despliegue o entrega de información sobre el flujo vehicular:<ul style="list-style-type: none"><li>• Estado de las vías</li><li>• Congestión y tráfico vehicular</li><li>• Eventos que impactan el tráfico de las vías</li></ul></li><li>– Despliegue o entrega de información sobre el sistema de transporte público:<ul style="list-style-type: none"><li>• Tiempo de espera de las rutas</li><li>• Paradas de las rutas</li><li>• Destino final de la ruta</li></ul></li><li>– Despliegue o entrega de información sobre el tiempo estimado de llegada al destino</li><li>– Despliegue o entrega de información sobre sistemas de micromovilidad con vehículos limpios:<ul style="list-style-type: none"><li>• Bicicletas</li><li>• Patinetas</li><li>• Vehículos eléctricos</li></ul></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Parque vehicular de transporte público</li><li>– Estaciones de transporte público</li><li>– Paraderos del sistema de transporte público</li><li>– Parque vehicular particular</li><li>– Cantidad máxima estimada de usuarios que accederán simultáneamente a cada uno de los sistemas de información al ciudadano</li><li>– Porcentaje de automatización de los centros de llamadas (sistemas de respuesta de voz interactiva y <i>bots</i> con relación a agentes humanos)</li><li>– Número de agentes en el centro de llamadas</li></ul>
Altavoces		
Centro de llamadas		

### Big data, analítica de datos e inteligencia artificial

Equipos de cómputo o computación en la nube (servidores, sistemas de almacenamiento)	<ul style="list-style-type: none"><li>Equipos de cómputo y aplicaciones que permiten:<ul style="list-style-type: none"><li>– El control de la flota del transporte público</li><li>– La programación de las rutas de transporte público</li><li>– Estudios de movilidad urbana</li><li>– La planificación de sistemas de transporte</li><li>– El procesamiento de imágenes</li><li>– La prevención de fraudes</li><li>– La integración de los servicios de transporte de proveedores públicos y privados en medios individuales y colectivos a través de una única aplicación web o móvil</li><li>– La selección por parte de los usuarios de los modos de transporte y rutas que tomará de acuerdo con sus necesidades específicas y para la realización del pago por el uso de los modos de transporte mediante una cuenta única</li><li>– El control del flujo vehicular</li><li>– Portales web</li><li>– Aplicaciones de información al usuario</li><li>– Aplicaciones de micromovilidad compartida con vehículos limpios (bicicletas, patinetas, automóviles eléctricos)</li><li>– Aplicaciones de movilidad como servicio</li><li>– Reconocimiento facial</li><li>– Reconocimiento de placas para la identificación de vehículos</li><li>– Procesamiento de imágenes para identificar y prevenir fraudes y evitar el acceso a zonas restringidas</li><li>– Prevención y detección de actos criminales en el sistema de transporte público</li><li>– Prevención y detección de incidentes en las vías públicas</li><li>– Garantizar la integridad, confidencialidad y disponibilidad de los datos</li><li>– Encriptación y garantía de la privacidad de la información</li><li>– Prevención de ataques que amenacen la seguridad e integridad de los sistemas informáticos utilizados para gestionar los sistemas de transporte público y las vías públicas</li></ul></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>– Parque automotor de servicios públicos</li><li>– Parque automotor vehicular</li><li>– Cantidad de centros de monitoreo y control de operaciones</li><li>– Cantidad estimada de vehículos que pasarán por los peajes o zonas donde se cobrarán cargos de congestión o contaminación en la hora de mayor tráfico</li><li>– Cantidad estimada de personas que harán uso del sistema de transporte público en hora pico</li><li>– Datos generados</li><li>– Velocidad de procesamiento y análisis de la información</li><li>– Licencias de aplicaciones para el control de dispositivos</li><li>– Licencias de aplicaciones de procesamiento (<i>big data</i>, analítica de datos, inteligencia artificial, otras)</li><li>– Licencias de las aplicaciones requeridas (control del tráfico, control de la flota, control del recaudo y facturación para el sistema de transporte público, control del recaudo de cargos por congestión y peajes, movilidad como servicio, micromovilidad, otras)</li><li>– Licencia de aplicaciones de ciberseguridad</li><li>– Cantidad de usuarios con permiso de acceso a lugares restringidos y tipos de acceso por usuario</li><li>– Licencias para el control de elementos de seguridad</li><li>– Licencias de aplicaciones para el reconocimiento de imágenes</li></ul>
Software y aplicaciones para el procesamiento de datos e imágenes, control del recaudo y facturación, sistemas de información al ciudadano, control y acceso de los usuarios y ciberseguridad		

a Algunos equipos o aplicaciones de la capa de control de flota de transporte y flujo de tráfico son descritos dentro de otras capas. Por ejemplo: GPS, CCTV, semáforos inteligentes.

# Identificación de los beneficios de la digitalización del sector de la movilidad

Los principales beneficios económicos que genera la digitalización en la movilidad, tanto en transporte público como privado, se presentan a continuación.

## Reducción de los tiempos de viaje

### ¿Por qué la digitalización de la movilidad puede reducir los tiempos de viaje?

La digitalización de la movilidad actúa por dos vías sobre la velocidad de circulación y los tiempos de viaje de la ciudadanía (Cheng et al., 2020)<sup>53</sup>. En primer lugar, las nuevas tecnologías habilitan una serie de acciones por parte de las autoridades de tráfico impracticables con los métodos tradicionales:

- Control del tráfico. El despliegue de una red de sensores y cámaras en la red vial, incluso en vehículos conectados con la infraestructura, permite monitorear el flujo vehicular en cada arco de la red. Esta información, procesada con algoritmos de inteligencia artificial, ayuda a optimizar los intervalos de los semáforos de forma que el sistema se adapte a las condiciones del tráfico en tiempo real (Khan, 2019)<sup>54</sup>.
- Señal de precios. La tecnología digital facilita la implementación de sistemas de cargos a los usuarios de las vías, incluso en mallas urbanas<sup>55</sup>. Los sistemas de cargos a los usuarios implementados en Londres, Singapur, Estocolmo y Milán, entre otras ciudades, han mostrado que los viajes en vehículo particular son elásticos al precio. Cada ciudad ha adoptado su propio esquema en términos de tecnología (cámaras, sensores), definición del área de restricción, sistema de cobro (cruzar un límite o circular dentro de un perímetro) y precios (niveles, estructura,

dinámicos o fijos). Con la imposición de estas medidas, en todos los casos analizados se redujo el flujo vehicular, aumentó la velocidad del transporte público y privado y disminuyeron los tiempos de viaje.

- La digitalización también facilita el cobro de peajes en la red nacional de carreteras. Los peajes electrónicos reducen los tiempos del tránsito de los vehículos por los pasos de peaje y evitan las colas en períodos de alta demanda.
- En áreas urbanas las nuevas tecnologías de cobro permiten estructurar proyectos de asociación público-privada (APP), que complementan la red vial y mejoran su desempeño, como en el caso de las autopistas en Santiago. Las concesiones viales en áreas urbanas se pueden estructurar porque existe la tecnología digital para la detección del vehículo, el cobro por el uso de la infraestructura y el recaudo en interconexión con el sistema financiero<sup>56</sup>.

La reducción en los tiempos de viaje también responde a acciones de los usuarios de las vías apoyadas en la infraestructura digital y su conexión con equipos en los vehículos:

- Los conductores toman sus decisiones de viaje con más información. La digitalización de la infraestructura vial y las aplicaciones digitales que procesan la información derivada permiten a los usuarios anticipar las condiciones de la

53 En un análisis econométrico con base en encuestas a los hogares en Estados Unidos, se encontró evidencia de la causalidad entre la digitalización de la movilidad y la reducción en los tiempos de viaje: con las nuevas tecnologías se reduce el número de viajes y su duración y se acorta la distancia de los viajes.

54 El estudio de Khan reporta crecimientos de entre el 5,0 % y el 5,6 % en la velocidad del flujo, una reducción al 66 % en la cola máxima promedio y una disminución del 32,4 % en el retraso por paradas.

55 Interrumpir el tráfico en una vía urbana congestionada para cobrar un peaje genera un costo social mayor que el recaudo del respectivo peaje por sus efectos en la velocidad del flujo y los tiempos de viaje.

56 La provisión de capacidad vial en áreas urbanas es un reto para la política pública. En zonas urbanas densas el precio del suelo es muy elevado y, en consecuencia, los costos de ampliar la capacidad vial son prohibitivos. Dimensionar una red vial urbana con la capacidad necesaria para movilizar los flujos esperados en horas pico a velocidades "normales" exige recursos económicos muy superiores a los que imponen soluciones alternativas, como gestionar la demanda a través de precios o fortalecer la oferta de transporte público colectivo. Por otra parte, la construcción de vías tiene indivisibilidades que impiden cuantificar exactamente la capacidad para satisfacer la demanda, lo que implica subdimensionar o sobredimensionar la malla. En el primer caso, los usuarios tienen que soportar los costos que impone la congestión; en el segundo, se genera un lucro cesante por la capacidad subutilizada.

ruta en términos de congestión, clima, siniestros, obras y eventos en la vía. Esto les permite tomar decisiones que reducen la congestión, tanto para su propio viaje como para los usuarios que se encuentran en circulación. Entre estas decisiones está la de aplazar o anticipar el viaje y cambiar de ruta o modo de transporte.

- Los vehículos conectados reducen los tiempos de reacción. Los vehículos equipados con sensores que detectan la presencia de obstáculos y procesan la información para enviar alertas e incluso tomar decisiones, como frenar, pueden responder más rápido ante las condiciones cambiantes del flujo vehicular y disminuir los tiempos de reacción<sup>57</sup>. Estos equipos permiten aumentar la velocidad media y reducir tiempos de viaje.

### ¿Cómo se valoran los beneficios económicos asociados con la reducción de la congestión y los tiempos de viaje?

La congestión es la principal externalidad en la actividad de transporte<sup>58</sup>. La decisión de viajar de una persona afecta en forma infinitesimal la velocidad del flujo vehicular, pero este impacto recae sobre todos los usuarios que están circulando en la vía. Es decir, la decisión individual del viaje genera un efecto pequeño, pero extendido a mucha gente. En ausencia de cargos de congestión o contaminación el equilibrio de mercado se traduce en un número mayor de viajes y congestión que el óptimo en términos sociales (Ramjerdi, 1995).

La ingeniería es capaz de parametrizar funciones que estiman la velocidad promedio en un tramo a partir de la relación entre la capacidad de la vía y el flujo vehicular observado. A medida que aumenta el flujo como proporción de la capacidad, la velocidad se reduce a una potencia que varía en un rango entre 2,5 y 4,0 (dependiendo de las características tanto de la vía como del flujo). La siguiente ecuación, tomada de Vickrey (1969) permite ilustrar la interacción entre la decisión de viaje de un usuario y la demora causada a todo el flujo de usuarios que

circulan en la vía. En la ecuación,  $z$  es la demora por vehículo asociada a la congestión y se mide como el diferencial entre el tiempo requerido para cubrir una unidad de distancia en las condiciones de tráfico actual ( $t$ ) y el tiempo requerido para recorrer esta unidad en condiciones de flujo libre ( $t_0$ ). Este valor es igual a la diferencia del inverso de las velocidades bajo los distintos escenarios de flujo ( $s$  y  $s_0$ , respectivamente) y se puede expresar en función del flujo de tráfico  $x$  y los parámetros calibrados con los modelos de ingeniería para las especificaciones del tramo  $a$  y  $k$  (función de demora, asociada a la función de flujo de capacidad)

$$z = t - t_0 = \frac{1}{s} - \frac{1}{s_0} = ax^k$$

La siguiente ecuación muestra que el efecto de la entrada de un vehículo en la demora agregada para todo el flujo ( $zx$ ) es del orden de  $k+1$ . Por cada minuto de retraso que experimenta el vehículo que ingresa al flujo, se imponen  $k$  minutos de retraso al resto del tráfico. De esta magnitud es el costo de la congestión cuando los flujos se acercan a la máxima capacidad de las vías. Con esta ecuación se muestra que las decisiones de viaje de un agente generan costos (externalidades) al resto de usuarios que circulan en el tramo.

$$\frac{d(zx)}{dx} = z + x \frac{dz}{dx} = ax^k + xakx^{k-1} = (1+k)z$$

Los economistas han propuesto desde hace varias décadas modelos formales para fijar el nivel óptimo de la tasa de congestión. Estos resultados son particularmente relevantes actualmente porque las tecnologías digitales han resuelto los problemas técnicos de exclusión. Puesto que se busca que el beneficio marginal sea igual al costo marginal social ( $MB = MSC$ ), el nivel óptimo de la tasa para gravar la externalidad es la diferencia entre el costo marginal social y el costo marginal privado ( $t = MSC - MPC$ ). El principio general para establecer tasas a externalidades negativas es atribuible a Pigou (1920)<sup>59</sup>.

57 Aun sin considerar los vehículos autónomos, que se encuentran en fase de desarrollo para su uso masivo, las nuevas generaciones de vehículos actualmente en el mercado están equipados con tecnologías que facilitan la conducción y elevan la seguridad.

58 El consumo o la producción de algunos bienes por parte de un agente tienen efectos indirectos en las actividades de consumo y producción de otros agentes. Cuando estos efectos no actúan a través del sistema de precios, por la ausencia de derechos de propiedad o dificultades de exclusión, se denominan externalidades.

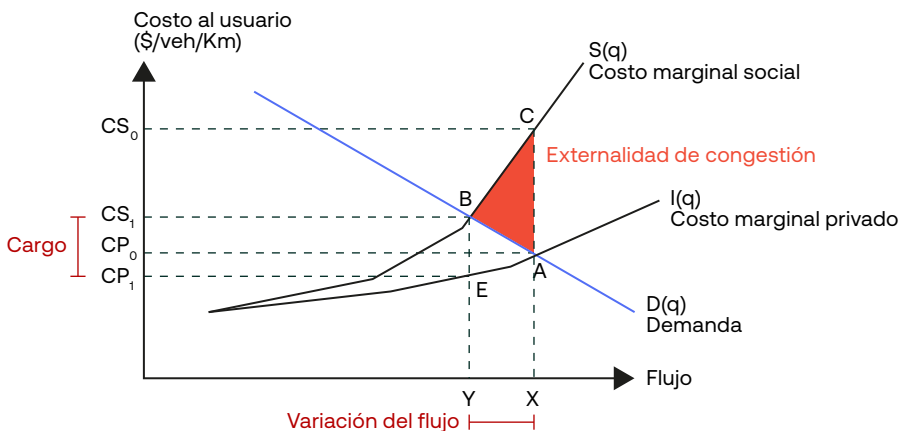
59 Como resume Sandmo (1976), los impuestos pigouvianos están dirigidos a corregir las ineficiencias del sistema de precios que provienen de las externalidades negativas. Bajo condiciones competitivas, los consumidores maximizan su utilidad igualando el beneficio marginal ( $MB$ ) al precio de mercado ( $P$ ). De igual forma, las firmas maximizan su utilidad igualando el precio al costo marginal privado de producción ( $MPC$ ). En ausencia de externalidades, los costos marginales privados y sociales ( $MSC$ ) coinciden. En consecuencia, el equilibrio de mercado implica que el beneficio marginal iguala el costo social ( $MB = MSC$ ) y se cumple la condición de asignación eficiente de los recursos económicos. Si hay efectos externos asociados a la producción o el consumo de un bien, como en el caso de la congestión, el costo marginal social es mayor al costo marginal privado ( $MSC > MPC$ ). Si, por otra parte, los precios que enfrentan productores y consumidores son los mismos, se desprende que el beneficio privado es menor que el costo social ( $MB < MSC$ ). Para reestablecer la eficiencia, es posible imponer una tasa ( $t$ ) que grave el bien que genera la externalidad (uso del vehículo en el caso de la congestión), de forma que el consumidor enfrenta un precio  $P$  y el productor recibe un precio  $P-t$ . En este nuevo equilibrio, el beneficio marginal se iguala al precio ( $MB = P$ ) y el costo marginal privado de producción se iguala a  $P-t$  ( $MPC = P - t$ ); con lo cual, el beneficio marginal es igual al costo marginal privado más la tasa ( $MB = MPC + t$ ).



La Figura 4.10, adaptada de Prud'homme y Bocarejo (2005), facilita la comprensión del origen y magnitud de la externalidad de congestión y la forma en que se determina el nivel óptimo de la tasa de cobro. El eje horizontal representa el flujo vehicular (veh./h) y el eje vertical, el costo que enfrenta el usuario (USD/veh./km). La función  $I(q)$  corresponde al costo marginal privado del viaje y comprende tanto los costos de operación del vehículo (combustible, llantas, lubricantes, etc.) como el costo de oportunidad del tiempo de viaje. A medida que aumenta el flujo, la velocidad se reduce y el tiempo dedicado al viaje crece

exponencialmente.  $S(q)$  representa el costo marginal social del viaje. Esta función depende de los mismos factores, pero crece más rápido, precisamente por la generación de externalidad de congestión. El área comprendida entre la curva de costo marginal social y costo marginal privado (área roja) corresponde al valor económico de la congestión. La recta entre el punto E y el punto B, representa el nivel óptimo de la tarifa de congestión. Con esta tarifa, y considerando la función de demanda, el flujo vehicular se reduce de  $x$  a  $y$ , y se lleva el mercado al punto del óptimo social.

Figura 4.10 — Microeconomía de la congestión vehicular



Fuente: Adaptado de Prud'homme y Bocarejo (2005).

En una evaluación del costo-beneficio realizada por Eliasson (2009) para el caso de Estocolmo, se emplearon las estadísticas de tráfico (flujos y velocidades) antes y después de la política para calibrar un modelo de transporte. Con el modelo calibrado se estimó el cambio en el excedente del consumidor que perciben los usuarios a través del método "rule of half"<sup>60</sup>, aplicado a cada arco en la red de acuerdo con la expresión bajo este párrafo. Por este método no se calcula la función de costo marginal social y, por lo tanto, no se valora explícitamente el cambio en la externalidad de la congestión. Los beneficios se miden analizando la variación

en el excedente del consumidor en cada una de las rutas de la siguiente forma:

$$W = \frac{1}{S} \sum_r (q_r^0 + q_r^1)(vt_r^0 - vt_r^1 - c_r)$$

donde  $W$  denota el cambio en el excedente del consumidor;  $q$ , el flujo;  $v$ , el valor del tiempo;  $t$ , el tiempo de viaje en el arco, y  $c$ , el cargo de congestión. El subíndice  $i$  identifica el arco y  $r$ , la hora del día<sup>61</sup>. El superíndice 0 corresponde a la situación sin cargo y el superíndice 1 a la situación con proyecto.

60 Con este nombre, que literalmente significa regla de la mitad, se conoce la teoría económica que sugiere que, cuando los consumidores cambian sus viajes motivados por un incentivo financiero, el excedente neto del consumidor equivale en promedio a la mitad de la variación del precio, teniendo en cuenta los cambios en costo financiero, tiempo de viaje, conveniencia y movilidad, según la perciben los consumidores.

61 A partir de este modelo, Eliasson (2009) estimó el aumento del excedente del consumidor asociado con la reducción en tiempo de viaje como resultado de los cargos de congestión de USD 70 millones al año.

En términos prácticos, la medición de los beneficios económicos por reducción en los tiempos de viaje exige la aplicación de un modelo de transporte para estimar el flujo y la velocidad resultante en los escenarios con proyecto y sin él. Con estos parámetros y una estimación del recorrido medio, es posible calcular la reducción en el tiempo de viaje para un viaje típico y su agregación a todos los usuarios de la zona objeto de la intervención. Como resultado, se obtiene un ahorro anual en minutos atribuible al proyecto. Para convertir este ahorro en una magnitud económica, se debe valorar el costo de oportunidad del tiempo.

En esta metodología, se plantea utilizar como indicador del valor del tiempo el ingreso medio por empleado reportado

en las encuestas a los hogares que se realizan en cada país, ponderado por la estructura socioeconómica en la ciudad, región o país bajo análisis. En efecto, el ingreso de los trabajadores representa el costo de oportunidad del tiempo. El tiempo dedicado al transporte en áreas urbanas, es tiempo que se podría destinar a las actividades laborales que generan ingreso<sup>62</sup>.

Como parte de la evaluación beneficio-costos es posible incluir, adicionalmente, el análisis de los impactos diferenciales de la medida por grupos de ingresos: aquellos que pagan más (peajes, cargos) y aquellos que ahorran más tiempo (transporte público o privado).

Cuadro 4.10 — Estimación del valor del tiempo

País	Unidad	Tipo	Valor	Año
Chile	Valor social del tiempo urbano (pesos/hora/pasajero)	Viaje	2,33	2020
		Espera	4,66	
		Caminata	4,66	
	Valor social del tiempo interurbano (pesos/hora)	Terrestre, por pasajero	7,64	
		Aéreo, por pasajero	16,11	
		Camión, por vehículo	9,23	
Colombia	Valor/hora (pesos colombianos)	Tiempo de viaje de trabajo - Nacional	3.101	2019
		Tiempo de viaje de trabajo - Urbano	3.450	
		Tiempo de viaje de trabajo - Rural	1.840	
		Tiempo de viaje relacionado con la salud - Nacional	3.076	
		Tiempo de viaje relacionado con la salud - Urbano	3.400	
		Tiempo de viaje relacionado con la salud - Rural	1.923	
		Tiempo de viaje relacionado con la educación - Nacional	2.981	
		Tiempo de viaje relacionado con la educación - Urbano	3.315	
		Tiempo de viaje relacionado con la educación - Rural	1.770	
México	Valor/hora (pesos mexicanos)	Viajes por motivo de trabajo	70,07	2020
		Viajes de ocio	42,04	

(continúa)

62 Algunos analistas prefieren utilizar el valor subjetivo del tiempo. Este parámetro, estimado en ejercicios de valoración contingente, expresa la disponibilidad a pagar de los usuarios por reducir el tiempo de sus viajes (p. ej., mayor tarifa por modos de mayor velocidad) o, de manera equivalente, el valor aceptado de una compensación por destinar más tiempo a la movilidad. El valor subjetivo del tiempo se utiliza en la parametrización de la función de demanda que alimenta los modelos de transporte. Para la evaluación económica, se considera más apropiado tener en cuenta el valor agregado sacrificado por la ciudadanía debido a los mayores tiempos de viaje que imponen las restricciones de movilidad.

País	Unidad	Tipo	Valor	Año
Perú	Valor del tiempo (soles/hora/pasajero)	Laboral - Urbano	6,81	2017
		Laboral - Rural	4,56	
	Valor del tiempo (soles/hora/ pasajero)	Transporte local privado - Lima - Urbano	7,83	
		Transporte local privado - Lima - Rural	5,17	
		Transporte local privado - Costa - Urbano	5,03	
		Transporte local privado - Costa - Rural	3,02	
		Transporte local privado - Sierra - Urbano	4,84	
		Transporte local privado - Sierra - Rural	2,29	
		Transporte local privado - Selva - Urbano	6,52	
		Transporte local privado - Selva - Rural	3,36	
		Transporte local público - Lima - Urbano	6,5	
		Transporte local público - Lima - Rural	3,31	
		Transporte local público - Costa - Urbano	5,14	
		Transporte local público - Costa - Rural	2,22	
		Transporte local público - Sierra - Urbano	4,74	
		Transporte local público - Sierra - Rural	2,09	
		Transporte local público - Selva - Urbano	5,01	
		Transporte local público - Selva - Rural	2,12	
		Transporte interurbano privado - Costa	7,12	
		Transporte interurbano privado - Sierra	7,23	
		Transporte interurbano privado - Selva	6,84	
		Transporte interurbano público - Lima	5,87	
	Transporte interurbano público - Costa	5,73		
Transporte interurbano público - Sierra	3,37			
Transporte interurbano público - Selva	4,41			
		Aéreo	15,22	
Uruguay	Valor/hora (pesos uruguayos)	Automóvil	123,85	2014
		Camioneta	164,21	
		Camión	182,28	
		Bus interurbano	1.448,13	
		Área interurbana - Automóvil	82,82	
		Área interurbana - Camioneta	109,81	
		Área interurbana - Camión	121,89	
		Área interurbana - Bus	479,62	
		Área rural - Automóvil	90,96	
		Área rural - Camioneta	120,6	
		Área rural - Camión	133,87	
		Área rural - Bus interurbano	247,8	
		Dinamarca	Valor/hora (USD)	
España			17,06	2005
Francia			10,26	1998
Noruega			6,32	1995
Suecia			4,34	1994
Suiza			15,85	2003

(continúa)

País	Unidad	Tipo	Valor	Año
Estados Unidos	Valor/hora (USD)	Viaje local - Personal	12,3	2012
		Viaje local - Negocios	24,1	
		Viaje local - Todos los propósitos	12,8	
		Viaje entre ciudades - Personal (terrestre)	17,2	
		Viaje entre ciudades - Negocios (terrestre)	24,1	
		Viaje entre ciudades - Todos los propósitos (terrestre)	18,7	
		Viaje entre ciudades - Personal (aéreo y carreteras de alta velocidad)	32,6	
		Viaje entre ciudades - Negocios (aéreo y carreteras de alta velocidad)	60	
		Viaje entre ciudades - Todos los propósitos (aéreo y carreteras de alta velocidad)	43,7	
Reino Unido	Valor/hora (GDP)	Automóvil - Empleador (ejecutivo)	14,05	2015
		Automóvil - Empleado (ejecutivo)	20,43	
		Automóvil - Empleado (obrero)	17,45	
		Automóvil - Trabajador por cuenta propia (ejecutivo)	13,03	
		Automóvil - Trabajador por cuenta propia (obrero)	8,55	
		Tren - Empleador (ejecutivo)	21,31	
		Tren - Empleado (ejecutivo)	29,93	
		Tren - Empleado (obrero)	19,48	
		Tren - Trabajador por cuenta propia (ejecutivo)	15,28	
		Tren - Trabajador por cuenta propia (obrero)	5,91	
		Otros transportes públicos - Empleado (ejecutivo)	10,33	
		Otros transportes públicos - Empleado (obrero)	8,22	
		Otros transportes públicos - Trabajador por cuenta propia (ejecutivo)	8,72	
		Otros transportes públicos - Trabajador por cuenta propia (obrero)	5,89	

Fuentes: Para Chile, Ministerio de Desarrollo Social y Familia (2021); para Colombia, Hernández Díaz (2019); para México, Torres et al. (2020); para Perú, MEF (2017); para Uruguay, Leiva Moya (2014); para Dinamarca, España, Francia, Noruega, Suecia, Suiza y Estados Unidos, US Department of Transportation (2014); para Reino Unido, Arup (2015).

## Reducción de los costos de operación de los vehículos

### ¿Cómo incide la digitalización de la movilidad en la 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. El rendimiento de los motores, dado en km/galón, m<sup>3</sup>/km o kWh/km, para vehículos con diésel o gasolina, gas natural o energía eléctrica, respectivamente, se comporta como una función polinómica de la velocidad. A velocidades bajas, el consumo por kilómetro es alto. A medida que aumenta la velocidad, se reduce el consumo por kilómetro hasta un límite de velocidad de óptimo rendimiento. Velocidades más allá de este umbral se traducen en mayores consumos de energía por kilómetro. En áreas urbanas, normalmente la velocidad se encuentra en el rango creciente de la función velocidad/

eficiencia. Es decir, si aumenta la velocidad, se reduce el consumo de energía por kilómetro y con ello los costos de operación de los vehículos.

De lo anterior se desprende que los conductos por los cuales la digitalización de la movilidad aumenta la velocidad, descritos en la sección anterior, son los mismos que inciden en una reducción de los costos de operación de los vehículos: optimización en el control de los flujos de tráfico, establecimiento de cargos a los usuarios y peajes electrónicos, sistemas de información a los usuarios de las vías y vehículos conectados con la infraestructura.

## **¿Cómo se estiman los beneficios económicos relacionados con una reducción en los costos de operación de los vehículos?**

La reducción de los costos de operación se puede modelar a partir de la relación implícita en el modelo conocido por las siglas en inglés HDM-4 entre el costo de operación del vehículo (VOC) y la velocidad en cada categoría vehicular<sup>63</sup>. La valoración de estos beneficios, entonces, tomaría como insumo las estimaciones del flujo vehicular y la velocidad obtenidos en el módulo anterior para las situaciones con y sin proyecto.

La información de flujos y velocidades, discriminada por categoría vehicular, se ingresa al HDM-4, el cual debe estar

## **Reducción de la emisión de contaminantes**

### **¿Por qué la digitalización de la movilidad se puede traducir en una mejor calidad del aire que se respira en las ciudades?**

Como se explicó, 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. Por esta razón, las causas identificadas entre movilidad y velocidad de circulación también se traducen en un impacto ambiental positivo de los proyectos de digitalización.

Por otra parte, la infraestructura digital cuenta con aplicaciones específicas para reducir las emisiones gestionando carriles o corredores. Por ejemplo, en infraestructuras equipadas con tecnología digital de monitoreo y control es posible adoptar medidas de gestión de la demanda (diferentes al precio), como establecer carriles exclusivos para vehículos con varios pasajeros o restringir el acceso a vehículos contaminantes en áreas densas y con problemas ambientales.

La digitalización, finalmente, incentiva la penetración de vehículos amigables con el ambiente, como las bicicletas, patinetas o autos eléctricos compartidos. Estos vehículos en alquiler pueden ser localizados (GPS), habilitados y usados

<sup>63</sup> El Highway Design Model (HDM) es una herramienta computacional diseñada por el Banco Mundial que permite, entre otras funcionalidades, estimar el costo de operación para varias categorías vehiculares ante diferentes condiciones de operación: topografía, estado y tipo de infraestructura, y congestión.

<sup>64</sup> En el mercado están disponibles otras herramientas computacionales con la capacidad de traducir los vehículos/km en emisiones de contaminantes para cada tipología de vehículo, tipo de combustible e incluso modelo (edad) del vehículo.

<sup>65</sup> En el estudio de Económica Consultores para Naturgas, se toma como referente las emisiones de un bus urbano de 80 pasajeros y el gas natural originado en la Guajira con un contenido calórico de 1 MBTU por KPC (pie cúbico).

parametrizado con las condiciones del país donde se ejecuta el proyecto. En particular, el modelo tiene la capacidad de estimar los costos (CAPEX y OPEX) por kilómetro si cuenta con información específica del país donde se hace la evaluación, por ejemplo, el valor del vehículo nuevo, el precio de los combustibles, lubricantes y llantas y el valor del tiempo de los operarios de mantenimiento, entre otras variables.

El ahorro resultante en términos de USD/km se agrega a todo el flujo, ponderando por la participación de cada tipo de vehículo. De esta forma se obtiene el ahorro anual en costos de operación de los vehículos generados por el proyecto.

mediante pago a través de aplicaciones en los teléfonos móviles. La electricidad como fuente de energía tiene cero emisiones en la fase de uso.

### **¿Cómo se valora en términos económicos el impacto ambiental de la digitalización en la movilidad?**

Nuevamente, es necesario contar con los resultados de la modelación del estudio de tráfico para caracterizar las velocidades y el flujo vehicular en las situaciones con y sin proyecto. Estos resultados, como se explicó, se procesan con el HDM-4 para obtener el ahorro en consumo de combustible. Finalmente, se cuenta con parámetros que traducen el uso de cada combustible (gasolina, diésel o gas natural) en emisión de contaminantes por unidad de consumo (galón o m<sup>3</sup>). Con esta aproximación es posible evaluar las emisiones evitadas gracias a la ejecución del proyecto en términos de material particulado (MP10 y MP2.5), CO<sub>2</sub> y óxidos de nitrógeno (NOx), entre otros<sup>64</sup>. El cuadro 4.11 presenta una estimación de los factores de emisión de contaminantes generados en la combustión de diésel y gas natural (Económica Consultores, 2019)<sup>65</sup>.

Cuadro 4.11 — Factores de emisión de contaminantes del diésel y el gas natural (ejemplo para un bus urbano de 80 pasajeros)

Combustible	CO <sub>2</sub> e (g/km)			MP2,5 (g/km)		
	Operación (TTW)	Aguas arriba (WTT)	Ciclo completo (WTW)	Operación (TTW)	Aguas arriba (WTT)	Ciclo completo (WTW)
Diésel	1,093	231	1,324	8.000E-04	0.000	0.001
Gas natural	1,175	249	1,425	8.000E-04	0.000	0.001

Fuente: Económica Consultores (2019).

Cuadro 4.12 — Factores de emisión de GEI y material particulado

Contaminante	Valor de referencia	Unidades	Comentarios
MP2,5	0,198	USD/gramo	Estimación local y actualizada a partir de datos del Plan Decenal de Descontaminación del Aire de Bogotá
	0,102	USD/gramo	Adaptado para la Unión Europea con transferencia de beneficios
CO <sub>2eq</sub>	20	USD/tonelada	Costo de abatimiento seleccionado para la contribución nacionalmente determinada (NDC) de Colombia

Fuentes: Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá (2010), Korzhenevych et al. (2014), Bocarejo et al. (2016) y Gobierno de Colombia (2015).

En el caso de la movilidad compartida, es necesario contar con una estimación de penetración inducida por el proyecto y del proceso de cambio modal. En particular se deben estimar las proporciones del modo original en que se movilizan los usuarios que migran hacia la movilidad eléctrica. Estas proporciones son relevantes porque permiten determinar el nivel de contaminación que caracterizaba a los beneficiarios del proyecto. El impacto sobre el ambiente es mucho mayor si un usuario de automóvil particular a diésel se pasa a una patineta eléctrica que si lo hace un usuario del transporte público. Algo similar ocurre con las políticas de prioridad de acceso en autos compartidos. Es necesario determinar de qué modos provenían los usuarios que incrementan el índice de ocupación por vehículo en respuesta a la política.

Una vez establecida la reducción en la emisión de contaminantes inducida por el proyecto es necesario cuantificar su valor económico. La contaminación en las áreas urbanas, particularmente el material particulado, tiene una incidencia alta en los índices de morbilidad y mortalidad en las ciudades. Los avances de la última década en el monitoreo tanto de la calidad del aire como de los patrones de morbilidad y mortalidad han permitido robustecer los análisis estadísticos de causalidad entre la contaminación ambiental y la salud pública. Se ha demostrado que los efectos del material particulado y otros contaminantes sobre las tasas de mortalidad son mucho más elevados de lo que se estimaba con la información disponible en el pasado (OCDE, 2014; OMS, 2021)<sup>66</sup>.

<sup>66</sup> Según la OCDE (2014), la contaminación del aire mata a cerca de tres millones de personas al año en el mundo y causa problemas de salud, como asma y enfermedades cardíacas, a muchos más. En el período de cinco años que va de 2005 a 2010, se presentó un incremento del 4 % en el número de muertes prematuras causadas por la contaminación del aire a nivel global. Por su parte, la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021) estima que "la contaminación ambiental del aire, tanto en las ciudades como en las zonas rurales, es causa de 4,2 millones de muertes prematuras en todo el mundo por año; esta mortalidad se debe a la exposición a partículas pequeñas de 2,5 micrones o menos de diámetro (MP 2,5), que causan enfermedades cardiovasculares y respiratorias y cáncer".

Por otra parte, se dispone de estudios que han fijado un valor económico a la morbilidad y a la mortalidad. En el primer caso, las estimaciones se basan en los gastos de atención médica asociados con enfermedades respiratorias relacionadas con la contaminación del aire y en el costo de oportunidad (salario) asociado con los días de incapacidad que en promedio reportan enfermos por estas causas. El valor estadístico de la vida humana es un parámetro polémico obtenido mediante estudios de valor contingente en los cuales se pregunta a un número grande de encuestados cuál sería su disponibilidad a

pagar por reducir la probabilidad de mortalidad por una causa específica. Los resultados de estos estudios están disponibles para países desarrollados. Su extrapolación a los países de América Latina, donde se aplicará la metodología, se basa en la relación entre el PIB per cápita del país del proyecto y el PIB per cápita en los países donde se realizó la encuesta.

Con las metodologías descritas, es posible estimar el beneficio económico por la reducción de la contaminación inducida por el proyecto.

## Reducción de la siniestralidad

### ¿Cómo incide la digitalización de la movilidad en la tasa de siniestralidad?

Los automóviles autónomos y conectados con la infraestructura están equipados con sistemas de comunicación inalámbricos avanzados, computador para procesar a bordo, sensores de vehículos avanzados y GPS. Estos equipos, unidos a la digitalización de la infraestructura, permiten anticipar situaciones de riesgo y actuar automáticamente para evitarlas. En el caso de los vehículos no conectados con la infraestructura, la existencia de equipos de monitoreo ayuda a las autoridades a disuadir de infringir la norma y alertar a los conductores ante posibles situaciones de riesgo.

Algunos estudios reportan reducciones significativas en la siniestralidad con la generalización de vehículos conectados a la infraestructura (V2I). Un estudio experimental en Australia, por ejemplo, reportó una reducción entre el 37 % y el 86 % en el número de víctimas mortales con la introducción del frenado automático y los sistemas de alerta en vehículos conectados en el sur del país (Khan et al., 2019).

## Optimización de la operación del transporte público

### ¿Cómo puede la digitalización incidir en la operación del transporte público?

Los apoyos digitales para monitorear las condiciones de las vías en tiempo real aportan información del tráfico y la demanda para alimentar la programación de los despachos de buses y optimizar el servicio en un corredor.

### ¿Cómo se miden los beneficios económicos de reducir la siniestralidad?

La cuantificación de los beneficios asociados con la reducción en los índices de siniestralidad atribuible a la digitalización de los vehículos y la infraestructura requiere una estimación de la reducción del número de siniestros atribuibles al proyecto, discriminando por daños materiales, heridos y muertos. Una vez establecido este parámetro se adoptan los siguientes criterios de valoración:

- Los daños materiales se valoran a partir de un promedio de costos de reparación obtenido de las estadísticas de las compañías aseguradoras.
- El valor económico asociado con la reducción en el número de heridos se puede aproximar a partir del costo del tratamiento médico e incapacidad laboral de estadísticas de las aseguradoras.
- Las muertes evitadas se valoran con el valor estadístico de la vida humana, tal y como se expuso en la sección anterior.

Por otra parte, con las tecnologías digitales las autoridades tienen capacidad de monitorear la trayectoria de los buses del servicio público y otorgarles prioridad en su paso por las intersecciones semaforizadas<sup>67</sup>. Con esta medida se puede imponer un castigo de mayor tiempo de desplazamiento a los usuarios del transporte privado si cometen una infracción, a la vez que aumenta la velocidad del transporte público y su atractivo para los usuarios. En América Latina un porcentaje mayoritario de la población aún se desplaza en transporte público.

<sup>67</sup> Como, por ejemplo, el TSP (*transit signal priority*).

Finalmente, la telemetría puede anticipar fallas mecánicas, con lo cual se programan oportunamente las intervenciones de mantenimiento y se reducen los eventos durante su operación.

### **¿Cómo se miden los beneficios económicos asociados con la digitalización del transporte público?**

Los beneficios asociados con la optimización del despacho se pueden estimar como la reducción en los costos de operación por evitar despachos ineficientes. De igual forma, se podrían evitar costos de capital por el ajuste de la flota a la demanda del servicio. Este efecto es nulo si la flota está correctamente dimensionada para atender la demanda en las horas de mayor concurrencia de público. La medición del beneficio exige que quien formule el proyecto estime los cambios operativos y en dimensionamiento atribuibles a la digitalización de la flota y la infraestructura por donde circula<sup>68</sup>. En particular, es necesario contar con una estimación de los costos variables por despacho y el número de despachos evitados, atendiendo los parámetros de calidad del servicio<sup>69</sup>.

La medición del valor económico del ahorro en tiempo de viaje de los usuarios del transporte público que se obtiene si se da

prioridad en los pasos con semáforo a los buses requiere una estimación de la demanda anual de pasajeros del transporte colectivo en el corredor, de los tiempos promedio de viaje con y sin prioridad en los semáforos y del costo de oportunidad del tiempo de los pasajeros. Como se ha mencionado, el valor del tiempo se puede aproximar como el ingreso medio de las personas empleadas ponderado por la composición socioeconómica de los pasajeros en este modo de transporte. Esta información se extrae de las encuestas de ingresos y gastos que realizan las agencias de estadística en cada país.

El beneficio relacionado con la reducción en las fallas de los buses durante el servicio se puede estimar a partir de los registros históricos del operador del porcentaje de horas de falla por vehículo y el tiempo medio que tarda la empresa en solucionar el problema a los pasajeros en el momento del incidente. Con estos parámetros y la ocupación media por bus es posible estimar el perjuicio económico de los incidentes mecánicos evitados por el proyecto. Nuevamente, se utilizaría el ingreso medio para valorar el perjuicio económico para los pasajeros involucrados en el incidente y el tiempo que dure la solución al problema.

## **Reducción de los costos asociados con el recaudo en el transporte público**

### **¿Por qué la digitalización permite reducir los costos del recaudo en el transporte público?**

El pago del servicio con tarjetas magnéticas u otros medios digitales reduce los costos del recaudo, el manejo de efectivo y la administración de fondos.

### **¿Cómo se estiman los beneficios asociados con el recaudo por medios digitales?**

Para valorarlo se requiere una estimación del costo del recaudo por tiquete mediante el esquema tradicional y

el sistema digital. Una vez definidos estos parámetros se debe agregar el diferencial de costos al flujo de pasajeros esperado en el servicio de transporte público colectivo.

Los sistemas tradicionales en que el conductor recauda directamente el efectivo de los pasajeros no exigen el despliegue de plataformas para gestionar medios de pago digitales, lo que se puede traducir en un ahorro en el costo del servicio. El ahorro en tecnología, no obstante, se traduce en un incremento significativo en la carga de responsabilidades del conductor, lo que puede derivar en una mayor tasa de siniestralidad, eventuales problemas de fraude e incomodidad para los pasajeros.

## **Mayor seguridad en el transporte público**

### **¿Cómo incide la digitalización en los estándares de seguridad en el transporte público?**

El monitoreo en tiempo real de los vehículos y los pasajeros, mediante cámaras de vigilancia y sistemas de alarma

conectados directamente con los operadores del sistema y las autoridades, disuade los comportamientos criminales en el transporte público y aumenta la probabilidad de captura y condena cuando se cometen delitos.

<sup>68</sup> En el caso del CAPEX, se debe considerar el pago equivalente anual del parque que se evitó adquirir.

<sup>69</sup> Se debe considerar que una reducción de despachos puede tener efectos negativos en la calidad del servicio por menores frecuencias, mayor tiempo de espera y reducción en la demanda.



## ¿Cómo se valoran los beneficios de la digitalización en los estándares de seguridad en el transporte público?

Quien estructure el proyecto debe presentar una estimación de la reducción en las estadísticas de delincuencia en el sistema de transporte público como

## Planeación de la infraestructura

### ¿Cómo incide la digitalización en los ejercicios de planeación de la infraestructura de transporte?

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. Con la información digital es posible mejorar las estimaciones del horizonte de tiempo en que cada sector vial alcanza los niveles de saturación, lo que permite programar inversiones para evitar situaciones de congestión.

respuesta al despliegue de tecnología de disuasión en los paraderos, estaciones y vehículos. La literatura económica, por su parte, ofrece metodologías para la estimación del costo asociado con distintos tipos de crímenes: homicidio, asalto, robo, violación (Heeks et al., 2018; Roman y Farrell, 2002; Chalfin, 2016)<sup>70</sup>.

### ¿Cómo se miden los beneficios de la digitalización en la planeación de la infraestructura vial?

Los ahorros derivados de una mayor información para estructurar y actualizar los ejercicios de planeación de las mallas viales pueden ser enormes en la medida en que se evitan proyectos no prioritarios o sobredimensionados. De igual forma, se pueden anticipar inversiones para evitar que sectores de la red entren a operar en condiciones de saturación. Estos beneficios, no obstante, dependen de la disciplina de la autoridad en el rigor de los ejercicios de planeación y la aplicación de los resultados para la priorización de proyectos. Los mejores datos facilitan la planeación, pero no aseguran su aplicación.

## Tipologías de proyectos

La digitalización en el sector de la movilidad es posible en un espectro amplio de equipos, funciones y beneficios, que varían según la estructuración específica de cada proyecto. El modelo para la evaluación beneficio-costos desarrollado en el marco de este reporte ha sido formulado para su aplicación en proyectos que

efectivamente se encuentren en la cartera de CAF y contengan un componente significativo de digitalización. En principio se plantea estructurar un modelo que se adecúe a las clases de proyectos previstos, escogidos a partir de una lista que incluye sistemas de transporte público y sistemas de control del tráfico.

## Digitalización de los sistemas del transporte público

Este tipo de proyectos comprende:

- Sistemas de control de flota, recaudo y facturación que emplean sensores en las vías, cámaras de video, torniquetes

automáticos y elementos de recaudo para el pago de los pasajes o tiquetes para el acceso. Estos elementos permitirán incorporar, entre otras funcionalidades: i) programación de los itinerarios y rutas, así como el control del flujo de vehículos y la

70. Roman y Farrell (2002) hacen un modelo para la estimación del costo en un mercado con demandantes (criminales) y oferentes (víctima, entendida como personas vulnerables expuestas). En esta configuración, el beneficio de una reducción de las tasas de criminalidad se modela como una reducción en el excedente de los criminales y un aumento en el de las víctimas. Las acciones de política, como la instalación de sistemas digitales de vigilancia, aumentan el riesgo para los criminales y reducen su excedente.

coordinación de las respuestas frente a la materialización de riesgos durante la operación del sistema de transporte público; ii) verificación de la operación y el funcionamiento del sistema; iii) evaluación de la conducción de los operarios y el estado y comportamiento de los pasajeros; iv) determinación en tiempo real del estado de las rutas, las demoras o los adelantos de los vehículos y la ocupación del sistema; y v) gestión y control de

los mecanismos y procesos a través de los cuales los usuarios acceden al sistema de transporte público.

- Sistemas de prevención y control del fraude y la criminalidad, que utilizarían principalmente cámaras de reconocimiento facial instaladas en los corredores y estaciones del sistema de transporte público y en los corredores viales.

## Digitalización de los sistemas del control de tráfico

En esta categoría, se encuentran:

- Proyectos de control del tráfico, monitoreo y vigilancia, que incorporen el uso de diferentes dispositivos, como sensores en la carretera y los vehículos, sistemas de ANPR, dispositivos dedicados de comunicaciones, cámaras de video, semáforos inteligentes y señalización dinámica. A través de estos dispositivos se pueden implementar, entre otras, las funcionalidades siguientes: i) ajuste de los estados de los semáforos de acuerdo con las condiciones de tráfico o para dar prioridad a vehículos de transporte público colectivos o destinados a la atención de emergencias (ambulancias, policía, bomberos, etc.); ii) prevención de siniestros mediante la generación de alertas; iii) control y verificación del cumplimiento de los límites de velocidad; y iv) imposición de multas ante violaciones a las normas de tránsito o de circulación.
- Sistemas de cobro electrónico por el uso de las vías, que se pueden implementar mediante sensores instalados en los vehículos y los puntos donde se cobran los peajes, con tecnologías de DSRC, ANPR o cámaras de video.
- Estudios de movilidad urbana y planificación del transporte, donde la información puede ser recopilada a través de

sensores instalados en los vehículos y las vías, los torniquetes para el acceso y salida al sistema por parte de los pasajeros y los dispositivos de los usuarios (tabletas, celulares, portátiles, etc.), con los que se pueden usar técnicas de procesamiento de datos avanzadas, como *big data*, analítica de datos e inteligencia artificial.

- Proyectos de micromovilidad compartida con vehículos limpios, donde se utilicen sensores instalados en los vehículos de transporte público, como bicicletas, patinetas o automóviles eléctricos, además de desarrollar aplicaciones que permitirán su integración con el sistema de transporte público masivo.
- Gestión de información sobre las condiciones del tráfico y del transporte público, lo que involucra el uso de sensores en las carreteras, las estaciones y los vehículos del transporte público y cámaras de video, y de la información recolectada a través de los torniquetes y sistemas de recaudo. Esta es procesada para informar a los usuarios sobre el estado de las vías (incidentes en las carreteras, estado del flujo vehicular, estado de las carreteras, etc.) y el sistema de transporte público (lugar donde se encuentran ubicados, tiempo estimado de llegada de los vehículos, ruta tomada, paradas que realizará, destino final y tiempo estimado de llegada al destino del usuario).

## Incentivos y barreras para la digitalización del 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 a fin de optimizar la forma en que se comunican los vehículos con la infraestructura y los vehículos entre sí. Las tecnologías más avanzadas de automóviles autónomos y drones solo se empezarán a

desplegar en América Latina 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 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 a cargo de distintos responsables. Idealmente, los países deben contar con un

protocolo único que permita que un vehículo pueda 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 detectar el paso de 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 cobrar a los usuarios por la utilización de las vías. La literatura económica muestra que, tanto desde el punto de vista del fisco como de los usuarios, el sistema óptimo consiste en cobrar cargos que aseguren la financiación del mantenimiento de la red. En áreas urbanas congestionadas, como se discutió, lo mejor es disuadir del uso de los vehículos privados motorizados en áreas congestionadas mediante el cobro de una tarifa. La norma debe permitir a las autoridades implementar estos sistemas de cobro, condicionado 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 favorablemente 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.

Finalmente, el sector público, a diferentes niveles de gobierno, debe 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. La adopción de nuevas tecnologías puede enfrentar rigideces contractuales con concesionarios del servicio o del recaudo.

## Indicadores para la digitalización en el sector de la movilidad

Los indicadores para medir la evolución de la digitalización de las infraestructuras en el sector de la movilidad en los países de la región se presentan en el Cuadro 4.13.

Cuadro 4.13 — Indicadores para el seguimiento de la digitalización de la infraestructura del sector de la movilidad

Indicador	Forma de cálculo
Adaptación de protocolos para unificar el cobro electrónico de cargos a usuarios	Si/No
Recaudo electrónico de cargos a usuarios	Recaudación total (millones USD) Número de puntos habilitados de cobro electrónico Recaudo por vehículo (USD/veh./año)
Despliegue de sistemas de semáforos inteligentes	Número de semáforos de nueva tecnología (para cada ciudad de más de 500.000 hab.) Participación de los semáforos inteligentes con relación a los semáforos totales (porcentaje)
Despliegue de cámaras de control del tráfico	Cámaras por km de red vial urbana (grandes ciudades)
Penetración del sistema de recaudo electrónico en sistemas de transporte público colectivo	Flota con sistemas de pago electrónico respecto a la flota total (porcentaje)
Cobertura de sistemas de cámaras para vigilancia en el transporte público	Estaciones con acceso al sistema con cámaras respecto a estaciones totales Vehículos equipados con cámaras respecto a vehículos totales del transporte público

# Digitalización de la infraestructura en el sector de la logística

## Experiencias internacionales en materia de digitalización en el sector de la logística

En este capítulo se analizan experiencias exitosas de digitalización en el sector logístico de cuatro países, Alemania, India, Corea del Sur y Panamá, además de una iniciativa regional europea. Los casos presentados comprenden proyectos dirigidos a mejorar el tráfico terrestre, marítimo y

ferroviario, agilizar el tránsito por aduanas, reducir los costos logísticos de entrega de mercancías e incrementar la eficiencia en el transporte. Los casos muestran el potencial que la digitalización tiene para transformar numerosos aspectos de la logística y ofrecer nuevos y mejores servicios.

### Digitalización del puerto de Hamburgo en Alemania

#### ¿Cuál es el problema?

El puerto de Hamburgo (Alemania) es el tercero más importante de Europa, con un movimiento de 8,1 millones de contenedores TEU<sup>71</sup> llenos en el año 2019 (Port of Hamburg, 2020). Su infraestructura comprende servicios intermodales portuarios, ferroviarios y viales.

Este puerto está ubicado en el río Elba, aproximadamente a 90 kilómetros de su desembocadura en el mar del Norte. Con un área de 7.145 hectáreas, cuenta con un espacio físico limitado, de manera que tiene la necesidad de administrar la infraestructura existente de la manera más eficiente posible. En particular, la Autoridad Portuaria de Hamburgo (HPA) determinó que era necesario realizar una mejor gestión del tráfico en las carreteras, el ferrocarril y el puerto. El objetivo central desde el punto de vista logístico era establecer una infraestructura inteligente que permitiera optimizar los flujos de información para gestionar los flujos comerciales del puerto de manera

más eficiente. El proyecto también incorporaba objetivos de sostenibilidad energética (Schirmer et al., 2016).

#### ¿Cómo lo resolvieron?

Los puertos marítimos son actores clave en las cadenas de suministro mundiales y se ven particularmente afectados por el cambio tecnológico, debido a los altos requisitos del sector logístico en relación con los costos, la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad. Por esa razón, la innovación digital es esencial para que los puertos se mantengan competitivos.

En el caso de los puertos, la transformación digital se ha dado en tres fases bien diferenciadas (Heilig et al., 2017):

- Una primera generación en la década de 1980, enfocada en la transformación a procedimientos sin papel.
- Una segunda generación en la década de 1990 y de 2000, cuando se dio una transformación a procedimientos

71 TEU es la sigla en inglés de la unidad de medida de contenedores, equivalente a 20 pies en el sistema anglosajón (aproximadamente 33 metros cúbicos).

automatizados, por la que las medidas para mejorar los flujos de carga dentro de los puertos se volvieron cada vez más importantes debido al aumento del tamaño de los buques y los volúmenes de carga. Por ello, se introdujeron plataformas centradas en el puerto, por ejemplo, sistemas de citas de camiones (*truck appointment system* o TAS).

- Una tercera generación (2010-actualidad), donde se ha pasado a procedimientos que aplican el concepto de puerto inteligente (*smart port*). Se denominan así los puertos donde se hace un mejor uso de los recursos disponibles para el conjunto de procesos comerciales mediante la coordinación de los actores y la capacidad de respuesta ante circunstancias cambiantes. En ellos se consideran los impactos económicos y ecológicos de las acciones mediante el uso de diversas fuentes integradas de información, utilizadas para apoyar la toma de decisiones casi en tiempo real.

La primera y la segunda generación de transformación digital se centraron en establecer las bases para optimizar los flujos de información en terminales y comunidades portuarias que permiten y mejoran la automatización, el comercio y su interacción en un contexto local o global. Por su parte, la tercera generación se focaliza en medir, controlar y apoyar las operaciones y las infraestructuras portuarias mediante una explotación mejorada de las fuentes de datos disponibles y las interacciones continuas en la comunidad portuaria. Su objetivo es tener un impacto activo en el comportamiento y las decisiones de los actores con el fin de aumentar la eficiencia de las operaciones portuarias generales y abordar ciertos problemas, como el tráfico y los problemas ambientales.

En ese contexto, en el año 2010, la Autoridad Portuaria de Hamburgo (HPA) lanzó la iniciativa de puerto inteligente, con dos proyectos principales: smartPORT Logistics (SPL) y smartPORT Energy (SPE). La idea principal era integrar diferentes centros de control del tráfico (terrestre, marítimo y ferroviario) en un centro de tráfico del puerto que permite, con base en datos en tiempo real, la toma de decisiones y la interacción continua con actores que participan activamente en tareas de transporte. De esta forma se integran el tráfico y la gestión de la infraestructura, permitiendo el encaminamiento

## Aplicación del IdC y el *big data* para optimizar la entrega de mercancía de DHL en India

### ¿Cuál es el problema?

India, con una población de 1.400 millones de habitantes, es el segundo país más poblado del mundo y el séptimo en extensión, con más de 3,2 millones de km<sup>2</sup> (Wikipedia, 2020c).

de los flujos de tráfico según la situación de congestión en el puerto. Esta integración se ha logrado mediante una variedad de sensores y actuadores (IdC) ubicados en la infraestructura portuaria para la coordinación de los flujos de tráfico fluvial y vial y para medir las condiciones de la infraestructura y los impactos ambientales. Los datos recopilados se procesan en sistemas independientes y luego se transfieren a un sistema de información central basado en la nube para explorar, agregar y distribuir información a través de diferentes canales a varios actores y tomadores de decisiones involucrados (Heilig et al., 2017).

### ¿Qué impacto han tenido las innovaciones realizadas?

La HPA considera que, gracias a la filosofía de puerto inteligente, el puerto de Hamburgo es un líder mundial en su campo porque garantiza una operación fluida, en la que la interacción entre la tecnología de sensores y los sistemas de análisis, pronóstico e información ofrecen enormes mejoras de eficiencia, lo que permitirá que el puerto mantenga su posición de liderazgo no solo en Alemania, sino en toda Europa (HPA, s. f.). Estas eficiencias se traducen en mejoras directas para los usuarios de los puertos, por ejemplo, los barcos y los camiones, los cuales reducen sus tiempos de espera para las operaciones de carga y descarga.

### ¿Cuáles han sido las principales lecciones aprendidas?

La HPA ha convertido al puerto de Hamburgo en una obra de base tecnológica, diseñada a partir de tres pilares fundamentales: infraestructura inteligente, flujo del tráfico y flujo comercial.

El puerto ha pasado por las tres fases de transformación digital, hasta llegar al concepto de puerto inteligente. Su experiencia ha llevado a que se indique en la literatura especializada que la adopción de tecnologías como el *bluetooth*, la red de área local inalámbrica (*wireless local area network* o WLAN), la computación en la nube, los dispositivos móviles, el IdC y el *big data* son las claves que permitieron a esta entidad perseverar y mantenerse como el puerto más importante del país (Ferretti y Schiavone, 2016).

La industria del comercio electrónico (*e-commerce*) ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años debido, entre otras razones, al acelerado crecimiento de la penetración de internet, que en la actualidad alcanza el 50 %. Según Statista, en el año 2015 el valor de mercado

de la industria del comercio electrónico en el país era de USD 20 millones, suma que ascendía a USD 200 millones en 2020 (Statista, 2020).

En la cadena de suministro del comercio electrónico, el paso final es el denominado “último kilómetro”, el cual generalmente se inicia en una bodega o centro de distribución y termina en las instalaciones o casa del usuario final. De acuerdo con DHL (2013)<sup>72</sup>, este último eslabón de la cadena de suministro es a menudo el de mayor costo y, por lo tanto, su optimización es fundamental para reducir los costos logísticos (Euromonitor Consulting, 2018). Para facilitar el acelerado desarrollo de la industria del comercio electrónico en el país, es fundamental optimizar la operación del “último kilómetro”.

### ¿Cómo lo resolvieron?

DHL, la compañía logística más grande del mundo, con presencia en más de 220 países, implementó en el año 2018 la solución SmartTruck, previamente desarrollada y testeada en Alemania, que combina el IdC con el *big data* para optimizar la operación del “último kilómetro” (DHL, 2020a)<sup>73</sup>.

La solución SmartTruck se encuentra constituida por una flota de 745 camiones inteligentes, 12 centros logísticos distribuidos a lo largo y ancho del país, una torre de control que coordina la operación y una aplicación móvil para que los usuarios consulten información en tiempo real (DHL, 2020b).

Cada camión inteligente está equipado con sensores para el monitoreo de las condiciones del vehículo y la mercancía, un sistema de posicionamiento GPS, dispositivos de telecomunicaciones para enviar y recibir datos y una pantalla para mostrar información relevante al conductor (DHL, 2020a).

Los datos dinámicos generados por los sensores y el GPS de los camiones, sumados a datos sobre el clima, el tráfico, la disponibilidad de clientes para recogida o entrega de mercancía, el nivel de prioridad del envío, las características técnicas y el historial de mantenimiento o accidentes de los camiones, entre otros, son analizados utilizando algoritmos de *big data*. Ese análisis permite: i) identificar rutas óptimas y dinámicas de entrega y recogida de mercancía; ii) predecir las necesidades de mantenimiento de los camiones; y iii) seguir el comportamiento de los conductores, incluyendo sus niveles de cansancio (DHL, 2020b).

Las rutas dinámicas incluyen la definición inicial diaria de un trayecto óptimo, donde se define la secuencia de entrega o recogida de la mercancía. Una vez en la vía, y según las condiciones dinámicas de tráfico, clima o disponibilidad del cliente, la ruta se actualiza en tiempo real y se comunica al conductor a través del sistema de navegación a bordo (DHL, 2013).

El algoritmo de mantenimiento preventivo toma los datos de un sistema de diagnóstico a bordo que monitorea el estado del vehículo con el objetivo de detectar el mal funcionamiento de alguna de sus partes y predecir la necesidad de realizar mantenimientos para evitar que los camiones salgan de operación (DHL, 2020b).

Finalmente, el sistema de diagnóstico a bordo permite monitorear el desempeño de los conductores, identificando y clasificando patrones para la mejora continua de la operación. El sistema es capaz de detectar los niveles de fatiga de los conductores, lo cual ayuda a prevenir siniestros (DHL, 2020b).

### ¿Qué impacto han tenido las innovaciones realizadas?

La integración del IdC, que facilita la recolección de datos en tiempo real, y el análisis de datos a través de técnicas de *big data* permiten el desarrollo de soluciones que optimizan la operación del “último kilómetro”, último eslabón de la cadena de suministro.

En términos generales, una solución inteligente de entrega de mercancías, como la implementada por DHL en India, permite mejorar diversos indicadores operacionales. Entre ellos se encuentran el tiempo de entrega, la utilización de activos, los kilómetros recorridos, la velocidad del recorrido, el consumo de combustible, las emisiones de CO<sub>2</sub> y la vida útil de la flota. Estos se traducen en una reducción de los costos para el operador logístico y en un mayor grado de satisfacción para los clientes.

Dentro de los indicadores de SmartTruck en India se encuentran (DHL, 2019b):

- Entrega a tiempo del 95 %.
- Seguimiento de la mercancía en línea y en tiempo real al 100 %.
- Reducción del tiempo de recorrido de hasta un 50 %.

<sup>72</sup> Para la elaboración de esta sección, se visitaron páginas web de DHL que han sido eliminadas posteriormente. En el texto, se indica la fuente original de la consulta, aunque ya no están disponibles en internet.

<sup>73</sup> Se puede encontrar información relacionada en la página web: <https://www.dhl.com/content/dam/dhl/local/global/core/documents/pdf/g0-core-wp-shortening-the-last-mile-en.pdf>

## ¿Cuáles han sido las principales lecciones aprendidas?

El desarrollo de una solución involucra la integración de diversas tecnologías, en este caso el IdC y el *big data*. La primera permite la recolección de datos en tiempo real y la segunda, obtener conocimiento a partir del análisis de los datos, así como predecir el futuro comportamiento de una variable de interés al monitorear otras variables que influyen en su funcionamiento.

## Digitalización de las aduanas en Corea del Sur

### ¿Cuál es el problema?

Las políticas comerciales de Corea del Sur, notablemente orientadas a la exportación, son uno de los factores más importantes de su éxito económico y han convertido al país en el quinto mayor exportador y el noveno mayor importador de bienes del mundo. En el año 2014 el comercio representó el 95,3 % del PIB y en 2018 dicha cifra era el 83 %, con importaciones de bienes que ascendían a USD 535.202 millones y exportaciones por USD 604.860 millones (Santander Trade, 2019).

Por esa razón, para Corea del Sur resulta de la mayor importancia contar con un sistema de aduanas eficiente, lo que ha implicado que el Servicio de Aduanas de Corea (KCS, por sus siglas en inglés) haya mantenido como meta sostenida reducir significativamente el tiempo y el costo logístico.

Desde la Convención de Kioto de 1973, el enfoque de la administración de aduanas surcoreana había sido minimizar el costo logístico y asegurar el despacho acelerado mediante la simplificación y estandarización de los procedimientos aduaneros. Sin embargo, con el Marco de Estándares para Asegurar y Facilitar el Comercio Mundial (SAFE, por sus siglas en inglés), establecido en 2005 por la Organización Mundial de Aduanas (OMA), la prioridad a nivel global fue evitar que se moviera carga ilegal a través de las fronteras. Es decir, ocurrió un cambio de paradigma, que pasó del despacho rápido a una logística internacional segura (Hur, 2009).

Adicionalmente, la KCS estableció como visión lograr que Corea tuviera el mejor servicio aduanero del mundo.

### ¿Cómo lo resolvieron?

Entre los años 2003 y 2009, la KCS realizó la exitosa implementación de tres planes estratégicos de largo plazo: un “Plan de aduanas de clase mundial” (2003-2005), un “Plan de

La optimización del “último kilómetro” no solo disminuye los costos del operador logístico, sino que también mejora la calidad del servicio y por tanto la satisfacción del usuario final. En consecuencia, siempre se debe considerar al usuario final en el diseño de las soluciones.

El desarrollo acelerado de una industria a su vez impulsa el desarrollo de otra. En este caso, la rápida adopción del comercio electrónico en la India ha impulsado la implementación de soluciones en el sector logístico, toda vez que este sector es un habilitador del sector del comercio.

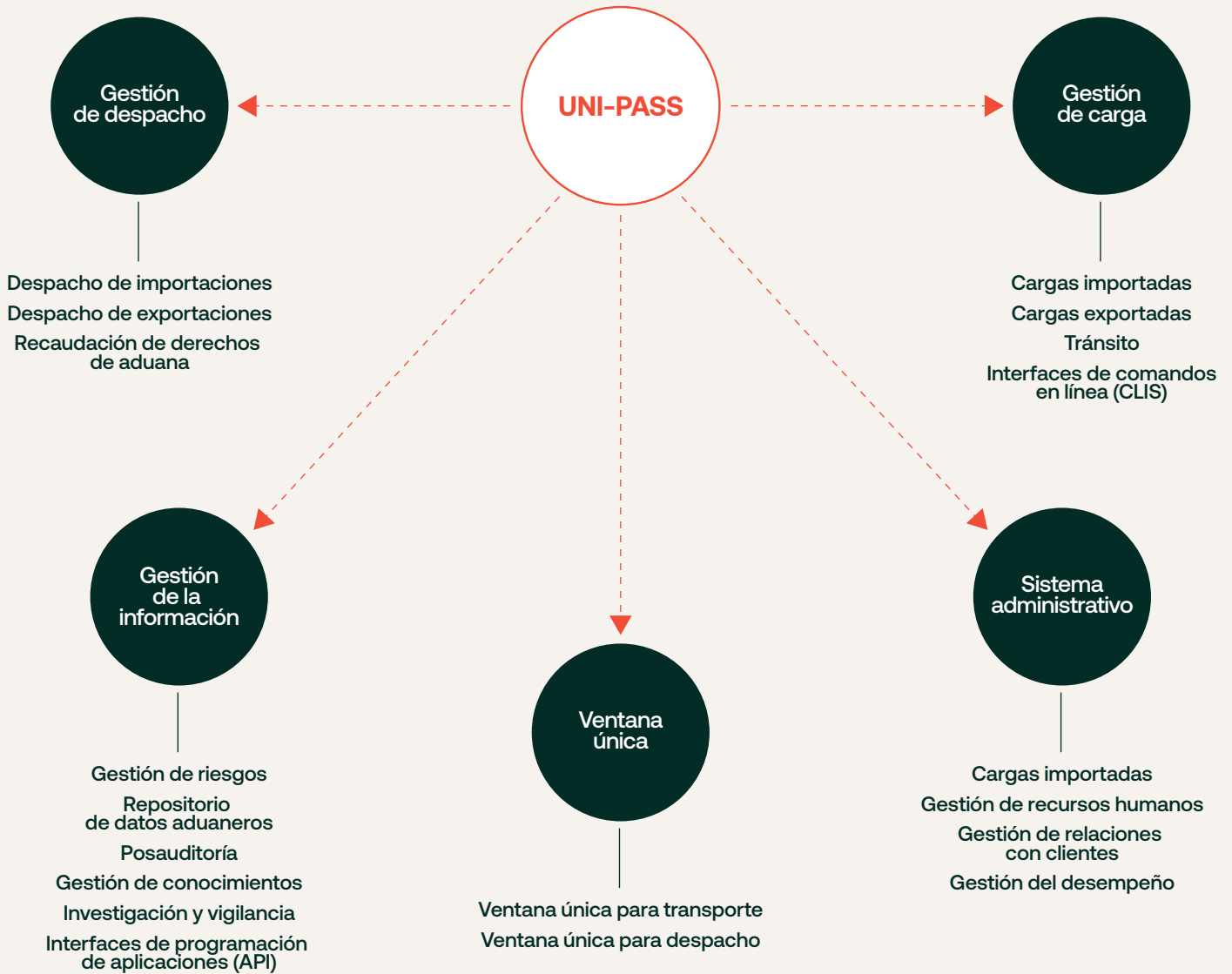
modernización del servicio aduanero” (2006-2009) y, a partir de 2010, una “búsqueda para ser el mejor servicio aduanero del mundo” (Hur, 2009).

El “Plan de aduanas de clase mundial” logró establecer los sistemas de despacho de exportación, importación y Gestión de relaciones comercial y el de ventanilla única, todos ellos basados en internet. Este último tenía por objetivo vincular electrónicamente a todas las partes interesadas, incluidas las agencias gubernamentales, las autoridades de confirmación de requisitos, los bancos y las empresas de logística.

A su vez, el “Plan de modernización del servicio aduanero” ayudó a compartir información en tiempo real sobre el manejo de la carga con las empresas de logística participantes para reducir el tiempo y el costo de procesamiento. Su propósito era facilitar el comercio y la seguridad de la carga en un momento en que se dio un aumento del volumen comercial a raíz de los tratados de libre comercio y la globalización.

Desde el punto de vista tecnológico, la KCS simplificó los procedimientos de autorización aduanera mediante la configuración de un sistema basado en la web, denominado UNI-PASS y que fue en su momento el primer sistema de autorización aduanero 100 % electrónico del mundo. En 2018 UNI-PASS conectaba a 169 agencias gubernamentales coreanas con 260.000 compañías, tales como empresas logísticas, comerciales, navieras, aerolíneas y bancos (Korea Customs Service, 2018). Su estructura funcional está representada en la Figura 5.1.

Figura 5.1 — Diagrama conceptual del sistema UNI-PASS



Fuente: Korea Customs Service (2018).



Si bien los dos planes mencionados fueron exitosos, la KCS comenzó a trabajar en 2009 en espacios de mejora en temas relacionados con el manejo de una operación logística segura. La entidad introdujo el programa de Operador Económico Autorizado (OEA) en mayo de ese año. El objetivo de dicho programa era reducir los costos logísticos y lograr la seguridad de la cadena de suministro. Las empresas certificadas como OEA en función de su historial de cumplimiento y seguridad pueden disfrutar de varios beneficios en los trámites de aduanas, como el despacho acelerado y la exención de inspección en el extranjero y en sus propios países.

Como parte de las actividades de gestión de riesgos, las cargas cuestionables están sujetas a una inspección minuciosa gracias a las etiquetas de RFID unidas a las cargas, lo que hace posible rastrear mercancías en todas las etapas de distribución, desde la producción, el transporte y el almacenamiento hasta el despacho. La tecnología de RFID también eliminó la transmisión manual de datos, que era el método anterior para controlar y verificar las cargas. Ahora, el movimiento de cargas se controla automáticamente, lo que facilita los procedimientos de despacho, y la KCS incluso rastrea los productos importados hasta que llegan a los distribuidores finales.

#### **¿Qué impacto han tenido las innovaciones realizadas?**

El “Plan de aduanas de clase mundial” logró resultados significativos: reducción de la documentación, del tiempo de procesamiento de carga y de los costos de logística comercial, así como una armonización de las actividades comerciales entre las autoridades interesadas.

El “Plan de modernización del servicio aduanero” resultó en el establecimiento de un avanzado sistema de gestión de aduanas basado en tecnologías de la información que

## **Digitalización de la gestión y operación del canal de Panamá y aplicación del internet de las cosas**

#### **¿Cuál es el problema?**

Panamá, con 4,1 millones de habitantes, es un país cuyo sector del transporte y logístico aportó un 21,6 % del PIB en 2016. La calidad de sus infraestructuras se constituye en su gran fortaleza en los procesos de intercambio comercial, siendo el canal de Panamá, con instalaciones y servicios de

permiten el seguimiento de la carga desde su llegada hasta su liberación, la presentación de la declaración de aduanas en cualquier momento y lugar y el intercambio de información por parte de los miembros de la cadena de suministro global.

Como resultado de la implementación de UNI-PASS, para 2009 la KCS había reducido el tiempo de despacho de importación a menos de dos horas, más rápido que la recomendación de la UNCTAD, que es de cuatro horas. Además, el tiempo requerido para liberar mercancías después de llegar a los puertos había disminuido de 9,6 días a 3,38 días (Hur, 2009).

En 2018, UNI-PASS estaba considerado el sistema más rápido entre los 182 países de la OMA. Con su implementación mejoraron indicadores como los tiempos para la autorización de exportaciones, que pasó de un día en 1992 a 1,5 minutos en 2015, y los tiempos de autorización para importaciones, que pasaron de 2 días en 1994 a 1,5 horas en 2015. Las mejoras obtenidas han permitido ahorros a los usuarios en términos de logística, almacenamiento de carga, reducción de gastos de personal e infraestructura (Korea Customs Service, 2018).

#### **¿Cuáles han sido los principales resultados?**

Durante seis años consecutivos, entre 2009 y 2014, Corea del Sur ocupó el primer lugar en el área de “comercio transfronterizo” del reporte “Doing Business” del Banco Mundial y fue seleccionado como uno de los países con las mejores prácticas aduaneras del mundo, lo que muestra el éxito de las iniciativas de digitalización de los procesos aduaneros descritos.

El modelo UNI-PASS ha sido implementado en 11 países del mundo, incluyendo República Dominicana, Guatemala y Ecuador (Korea Customs Service, 2018).

clase mundial, el eje en torno al cual se desarrollan servicios logísticos a escala nacional (CAF, 2016c).

El canal de Panamá cumple un importante rol en el movimiento mundial de mercancías, como punto de tránsito entre el océano Atlántico y el Pacífico. Por él pasan 34 rutas comerciales marítimas, que atienden la costa este y oeste de Estados Unidos, Europa, Asia, Sudamérica y el Caribe. En 2019

el canal tuvo un movimiento de más de 468 toneladas netas CP/SUAB<sup>74</sup> (Autoridad del Canal de Panamá, 2020). Se calcula que aproximadamente el 3 % del comercio mundial marítimo transita cada año por esta vía navegable (AGCS, 2014).

Con más de 100 años en operación, el canal de Panamá afronta desafíos relacionados con: i) cómo controlar y mantener operaciones seguras y eficientes mediante el uso de información en tiempo real, y ii) cómo utilizar esta información y realizar predicciones que permitan tomar decisiones que afectan la operación, las tarifas de uso y el crecimiento futuro del canal, de manera que siga siendo relevante y competitivo. El objetivo macro consiste en operar esta infraestructura de la forma más eficiente posible.

Desde el punto de vista técnico, el reto era mantener las instalaciones legadas, con una variedad de sistemas tecnológicos y equipos, e integrarlos con las tecnologías más avanzadas para la recolección de datos que monitorean y controlan cada aspecto de la operación del canal. En particular, el foco se ha puesto en la gestión y operación del canal de Panamá mediante centros de control de tráfico marítimo, la gestión del recurso hídrico y sistemas de seguridad, apoyados en el uso extensivo del IdC (Safa et al., 2019).

### ¿Cómo lo resolvieron?

El canal de Panamá fue construido por Estados Unidos entre 1904 y 1914, a partir de las obras que fueron empezadas por los franceses en la década de 1880. A lo largo de sus más de 100 años de operación, el canal ha impulsado la economía global, conectando las rutas marítimas del mundo y distinguiéndose como un líder innovador en la aplicación de tecnología logística marítima mediante la realización de actualizaciones y expansiones.

Recientemente, la Autoridad del Canal de Panamá (ACP) ha realizado contratos de modernización enfocados en la digitalización y el uso del IdC con los siguientes objetivos: i) hidrológicos, incluyendo el monitoreo de los niveles de agua y las plantas hidroeléctricas en los lagos Gatún y Miraflores y en las estaciones de bombeo; ii) el monitoreo, control y despacho de los barcos en tiempo real; iii) el control de la seguridad en la operación del canal; y iv) el despacho del ferrocarril intermodal (Safa et al., 2019).

El monitoreo, control y despacho de los barcos se hace por medio de un sistema electrónico de visualización e información (ECDIS, por sus siglas en inglés) para la

navegación marítima. La información que proporciona el ECDIS se despliega en tiempo real en las salas de control del canal y permite, entre otros aspectos, conocer las condiciones climatológicas, identificar y seguir a las embarcaciones, así como coordinar los remolcadores y dragas. Un *software* de gestión de embarcaciones coordina los horarios de llegada de los buques al canal de Panamá. El sistema también informa de la disponibilidad de esclusas y remolcadores, junto con las tripulaciones necesarias para las operaciones. La programación del cruce de embarcaciones debe considerar diversas variables, incluyendo la hora de llegada, la naturaleza de la carga y si se reservó con antelación el paso del canal. Los barcos más grandes requieren más agua en las esclusas, lo que aumenta el tiempo de tránsito. También hay momentos en que las esclusas pueden estar en mantenimiento y no funcionan. En 2017 se anunció la implementación de un sistema único integrado de planificación y programación, que utiliza algoritmos y modelos para determinar todas las rutas disponibles para los barcos y puede planificar con semanas de anticipación. El objetivo central de estos sistemas es reducir el tiempo de espera de las embarcaciones e incrementar el número de barcos que cruzan el canal (Safa et al., 2019).

Por otra parte, la aplicación del IdC en el canal del Panamá permite el monitoreo y la gestión de los datos sobre el desempeño de los equipos, el uso de energía y las condiciones ambientales en tiempo real, lo que mejora los procesos de toma de decisiones y ayuda a mitigar los riesgos operacionales. También se utiliza para la sincronización automática con las estaciones meteorológicas locales, de manera que los sistemas de programación incorporan información que ayuda a afrontar cambios súbitos del clima en el área.

En cuanto a los sistemas de seguridad, la Autoridad del Canal de Panamá (ACP) contrató un sistema integrado de control y seguridad de última tecnología, que incluye control del acceso a edificios, control de vehículos, alarmas perimetrales, detección de intrusos en edificios y sistemas de control de video y grabación para las esclusas en los lados del canal del Pacífico y el Atlántico, así como de los edificios asociados. De esta forma, la seguridad del canal se controla a través de sistemas de alta tecnología que registran, monitorean y regulan el acceso y las acciones de embarcaciones, empleados y visitantes.

A su vez, la Panama Canal Railway Company (PCRC) implementó un sistema de despacho y control de trenes

74 El sistema de medición de tonelaje utilizado en el canal se conoce como Sistema Universal de Arqueo de Buques del Canal de Panamá (CP/SUAB), siguiendo las normas promulgadas por la Convención Internacional de Arqueo de Buques de 1969. Una tonelada neta del canal es igual a 100 pies cúbicos de capacidad volumétrica (Arroyo, 2015).

diseñado para evitar colisiones, imponer límites de velocidad y ayudar a proteger a los trabajadores y equipos ferroviarios. El sistema interactúa con la base de datos de la computadora a bordo de la locomotora, que contiene información de seguimiento, como apartaderos, desvíos, puntos de conmutación y señales. También incorpora el sistema de despacho de telemetría, que emite o elimina autorizaciones para trenes en cualquier segmento de la vía o ruta dentro del sistema y utiliza un GPS en tiempo real de alta precisión.

### ¿Qué impacto han tenido las innovaciones realizadas?

El canal de Panamá está mejorando y adaptándose al aumento del tráfico y de embarcaciones más grandes que transportan una mayor variedad de bienes a medida que el comercio mundial continúa creciendo.

La implementación de un sistema único integrado de planificación y programación reducirá el tiempo de espera de

## Corredores logísticos de la TEN-T en Europa

### ¿Cuál es el problema?

La Unión Europea (UE) es una entidad geopolítica cuyos países miembros se encuentran asociados económica y políticamente (Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación, 2019). Actualmente está conformada por 27 países, teniendo en cuenta que el Reino Unido salió de este bloque el 31 de enero de 2020. Sus miembros son: Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, Chequia, Chipre, Croacia, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Países Bajos, Polonia, Portugal, Rumanía y Suecia (Unión Europea, 2020a).

La superficie de la UE es de 4 millones de km<sup>2</sup> y tiene una población de 446 millones de habitantes. En términos de superficie, Francia es el país más grande de la UE y Malta el menor (Unión Europea, 2020b).

Dentro de sus principales logros se encuentra la creación de una moneda única. Actualmente está construyendo un mercado único en el que personas, bienes, servicios y capitales circulan entre los Estados miembros con la misma libertad que si lo hicieran dentro de un mismo país.

Uno de los sectores estratégicos de la UE es el de transporte, por su rol en la integración regional, al viabilizar y facilitar la libre circulación de personas, servicios y bienes (Unión Europea, 2019). Es un sector que permite además el crecimiento de la economía, al representar cerca del 5 % del PIB, y la creación de

los buques, aumentará la eficiencia al hacer que más barcos atraviesen las esclusas y optimizará los costos relacionados con el uso del canal.

### ¿Cuáles han sido las principales lecciones aprendidas?

La ACP ha logrado la integración de los sistemas antiguos con una amplia variedad de sistemas y equipos de última tecnología para recopilar datos y traducirlos en información útil que se utiliza en la planificación y ejecución de las operaciones diarias, generando innovaciones en logística marítima, ferrocarriles intermodales e industria portuaria.

Este proceso ha mostrado que la integración, actualización y expansión, mediante el uso extensivo de la digitalización y el IdC, son un enfoque clave de la logística marítima y las industrias portuarias.

puestos de trabajo, empleando directamente a casi 10 millones de personas (Unión Europea, 2011).

En 2011 el transporte europeo se encontraba en una encrucijada, debiendo hacer frente tanto a antiguos como a nuevos problemas asociados (Unión Europea, 2011), entre ellos:

- El transporte eficiente de ciudadanos y mercancías con el fin de satisfacer las necesidades de toda su población.
- El cumplimiento de las exigencias medioambientales para mitigar el cambio climático y cumplir la meta de limitar a menos de 2°C el aumento de la temperatura, con el objetivo de reducir en un 60 % las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector de transporte antes de 2050, comparándolo con los niveles de 1990.
- Garantizar la unión de los sistemas de transporte orientales y occidentales, mediante el cierre de las brechas de infraestructura que existen en estos dos lados del continente, a fin de resolver los problemas de congestión terrestres y aéreos.
- Reducir la dependencia del petróleo, haciendo un uso más eficiente de la energía e incorporando nuevas tecnologías, que, además, evitarían el declive de la industria del transporte europeo, manteniendo su posición competitiva frente a mercados de transporte de otras regiones del mundo.

## ¿Cómo lo resolvieron?

Con el fin de buscar soluciones a esta problemática, la UE definió iniciativas enfocadas en la creación de un marco eficiente para los usuarios y los operadores de transporte, la implantación de nuevas tecnologías y el desarrollo de infraestructuras adecuadas (Unión Europea, 2011).

Dentro de estas iniciativas se encontraba la definición de nuevas orientaciones para el desarrollo y modernización de la Infraestructura de la Red Transeuropea de Transporte (TEN-T, por sus siglas en inglés). La TEN-T comprende una red de transporte intermodal (modos terrestre, aéreo y acuático) tanto de mercancías como de personas cuyo fin es fomentar la cohesión territorial, el crecimiento económico y la integración de las regiones orientales y occidentales de la UE mediante el desarrollo de infraestructuras, flujos de información y procedimientos en todo el sistema de transporte (Unión Europea, 2011 y 2013; Óberg et al., 2016).

La normativa de la UE establece que la TEN-T se debe desarrollar mediante una estrategia de dos capas, consistentes en una red global y otra básica. La primera hace referencia a la red de transporte de ámbito europeo, que garantiza la accesibilidad y conectividad de todas las regiones de la Unión, incluidas las zonas remotas, insulares y periféricas. Se espera que esta red esté completada en el año 2050. La segunda hace referencia a las conexiones que unirán los nodos más importantes y se estima que estará implementada en el año 2030 (Unión Europea, 2013; 2020c).

La columna vertebral de la red básica está constituida por nueve corredores y dos prioridades horizontales: el Sistema de Gestión del Tráfico Ferroviario Europeo (ERTMS, por sus siglas en inglés) y las Autopistas del Mar, que tienen como fin agilizar y facilitar el desarrollo coordinado de esta red.

Para la implementación de estos nueve corredores y prioridades horizontales se definió una estructura de gobernanza conformada por un coordinador regional, designado por la Comisión Europea, un secretario, que apoya al coordinador, y un foro (Unión Europea, 2020c; Óberg et al., 2016).

Dentro de las funciones desempeñadas por el coordinador europeo se encuentra la de facilitar y supervisar la implementación de la TEN-T, asegurando la existencia de un plan de trabajo. Dicho plan debe ser aprobado por los Estados involucrados en el corredor e identificar los puntos críticos para su desarrollo e implementación, como, por ejemplo, las inversiones requeridas para el despliegue de infraestructura (Óberg et al., 2016).

Por su parte, de acuerdo con la normativa, el foro del corredor se conforma de común acuerdo entre los Estados involucrados en él y el coordinador europeo y tiene un papel consultivo. En este foro pueden participar autoridades locales y regionales, operadores y otros interesados en el corredor (Óberg et al., 2016).

Los principales actores de esta iniciativa son la Comisión Europea y los Estados miembros involucrados en el corredor.

La Comisión Europea, además de nombrar a los coordinadores europeos, tiene facultades para aprobar modificaciones específicas con respecto a los requisitos originalmente definidos para la TEN-T. La Comisión también puede realizar ajustes a las especificaciones técnicas de esta red y administrar el instrumento para su financiación, denominado Mecanismo Conectar Europa (CEF, por sus siglas en inglés), mediante el cual se cofinanciarán las inversiones de infraestructura requeridas por la TEN-T (Óberg et al., 2016).

Por su parte, los Estados miembros tienen la responsabilidad de asegurar que la infraestructura se construya cumpliendo las disposiciones normativas y legales, tales como las relacionadas con materias de seguridad y señalización de las vías, así como garantizar la existencia de conexiones intermodales integradas. Los Estados miembros también deben cooperar con el coordinador europeo, suministrándole toda la información relevante para el desarrollo de la TEN-T, por ejemplo, la relacionada con los planes nacionales o el progreso de la implementación del corredor. Igualmente, deben asegurar que durante las diferentes fases de su implementación haya canales de comunicación continuos con las partes interesadas locales y regionales del corredor.

Con respecto a la UE, esta entidad desempeña un papel importante en la armonización de estándares, la definición de lineamientos para mejorar la seguridad en el transporte, salvaguardar las condiciones de trabajo y el establecimiento de acciones que mitiguen los posibles efectos adversos que tendría el desarrollo de los corredores sobre el medio ambiente.

Otros actores reconocidos por la normativa son las ciudades, que se identifican como puntos logísticos urbanos, donde se pueden obtener mejoras de las condiciones medioambientales, y los puertos aéreos y marítimos, que constituyen nodos logísticos, donde los cuerpos de seguridad juegan un importante papel para que no se interpongan condiciones discriminatorias de acceso.

La gobernanza es una parte importante en el desarrollo de la TEN-T. Sus temáticas son tratadas en los diferentes estudios y documentos en los que se estructura la implementación y el marco normativo de esta iniciativa. Estos estudios y

documentos se centran en definir las responsabilidades y actividades de la Comisión Europea y de los Estados miembros involucrados en los corredores. Igualmente reconocen otros actores mencionados anteriormente, como las ciudades, los puertos, las autoridades regionales y el sector privado, cuya participación es requerida para mejorar los resultados de la implementación y desarrollo de los corredores logísticos. Esos foros han demostrado ser una herramienta efectiva para involucrar y fomentar la participación de estos actores en el diseño y desarrollo de los corredores (Óberg et al., 2016).

Con respecto a la digitalización, en el año 2010, la Unión Europea expidió la Directiva 2010/40/UE (Parlamento Europeo y Consejo Europeo, 2010), donde se establecía un marco para la implantación de Sistemas de Transporte Inteligentes (STI). La directiva tomaba en cuenta la importancia de las TIC en el funcionamiento y la gestión de las redes y los sistemas de transporte de mercancías, dado que mejoran la eficiencia tanto de los procesos como del intercambio de información, facilitando la integración intermodal y aumentando la velocidad de las operaciones. Ese marco estaba dirigido a asegurar el cumplimiento de las especificaciones adoptadas por la Comisión respecto a las aplicaciones que garantizan la compatibilidad e interoperabilidad de este sistema. El SIT abarca aspectos más amplios que los relacionados con la implementación de sistemas digitales en los corredores logísticos de la TEN-T, tales como la movilidad dentro de los sistemas de transporte en las ciudades.

Como parte de esta iniciativa, la UE creó el sistema de información TENtec. La finalidad de dicho sistema es coordinar y dar soporte a la TEN-T mediante el almacenamiento y la gestión de datos técnicos, geográficos y financieros para el análisis, la gestión y la toma de decisiones de políticas relacionadas con la TEN-T y el programa de financiación subyacente. Todas las partes interesadas se benefician de una mayor visibilidad, calidad de los datos y una visión general actualizada y sistemática de la ejecución presupuestaria y la implementación técnica de cada proyecto de la TEN-T.

Adicionalmente, en el año 2015 la UE creó el Foro de Transporte y Logística Digital (DTLF, por sus siglas en inglés) con el objetivo de mejorar la interoperabilidad digital en la logística y el transporte de mercancías en Europa (Unión Europea, 2015). Con ello, impulsó una estrategia coherente entre los diferentes países miembros para eliminar las barreras técnicas, operativas y administrativas entre los modos de transporte y dentro de ellos mediante un intercambio electrónico de información más eficiente (Digital Transport & Logistics Forum, 2020a).

Para alcanzar este objetivo, el DTLF brinda asesoramiento técnico a la Comisión Europea sobre el desarrollo y la aplicación de normas, políticas, programas y proyectos en

temas relacionados con la digitalización del transporte y la logística. Además, facilita el intercambio de información sobre iniciativas, proyectos y asociaciones que se ocupan de la digitalización de estos sectores, preparando documentos y proponiendo a la Comisión soluciones que promuevan el intercambio electrónico de información entre los diferentes actores que interactúan en los sectores del transporte y la logística.

Actualmente, este foro se encuentra trabajando en dos temas de interés donde se han conformado grupos de estudio: i) el desarrollo de sistemas de información digital interoperables que optimicen los flujos de carga en los corredores de transporte; y ii) la promoción del uso de documentos electrónicos. Otros temas de interés son la infraestructura para el intercambio de datos y la gobernanza, protección y responsabilidad de los datos (Digital Transport and Logistics Forum, 2020b). Sin embargo, no se evidenció la conformación de grupos de trabajo que estuvieran estudiando sus problemáticas y soluciones.

El trabajo del grupo de “promoción del uso de documentos electrónicos” se centra en promover y facilitar el uso de documentos de transporte en ese formato, para que sirvan como prueba de la existencia de un contrato de transporte (guías de embarque y conocimiento de embarque) y sean aceptados tanto por las autoridades de los Estados miembros, como por los bancos y las compañías de seguros. También se dedica a explorar hasta qué punto los elementos de información y datos contenidos en los documentos de transporte podrían armonizarse para los diferentes modos y el potencial para desarrollar infraestructuras y entornos comunes para la transmisión de datos. Además, analiza otros documentos relacionados con el transporte (asociados al medio de transporte y los que portan los conductores) (Digital Transport and Logistics Forum, 2020c).

Por su parte, el trabajo del grupo de “desarrollo de sistemas de información digital interoperables” se enfoca en lograr un intercambio confiable de información entre las empresas y entidades gubernamentales de los países, así como entre estos y los diferentes modos de transporte a lo largo de corredores y cadenas de suministro. Para ello identifican los obstáculos operativos que dificultan el flujo de carga a lo largo de los corredores de transporte de la TEN-T y las barreras técnicas, legales y administrativas que limitan dicho acceso y disponibilidad de información. El grupo propone medidas a corto, mediano y largo plazo para superarlas, con el fin de aumentar la interoperabilidad e interconectividad de los sistemas y servicios digitales en todos los corredores de la TEN-T (Digital Transport and Logistics Forum, 2020c).

Recientemente, se informó de que la UE financiará 11 proyectos para probar nuevas tecnologías del ecosistema de 5G europeo, de los cuales tres tienen como fin proporcionar aplicaciones en movilidad transfronteriza que allanen el camino a sistemas de transporte autónomos en las principales carreteras, trenes y rutas marítimas (Unión Europea, 2020d).

Los proyectos transfronterizos servirán como pilotos para probar y validar diferentes casos de uso en el campo de la movilidad y el transporte utilizando tecnologías 5G. Se implementará en diferentes modos de transporte, tales como automóviles, camiones, trenes, cápsulas, barcas y barcos, y brindará una conectividad mejorada para los usuarios que utilicen estos corredores logísticos. Es importante resaltar que estos proyectos son complementarios a los proyectos de prueba de corredores 5G, que fueron lanzados en noviembre de 2018. Se estima que las inversiones requeridas para su ejecución ascienden a los EUR 41 millones, de los cuales EUR 31,1 millones serán financiados por la UE en el marco del programa Horizonte 2020. Los resultados de su ejecución se utilizarán para diseñar y estructurar el despliegue de corredores 5G en Europa, que se espera sea incluido en el programa digital del Mecanismo Conectar Europa 2021-2027.

Los proyectos reúnen a una amplia variedad de actores. Entre ellos se encuentran los operadores y proveedores de telecomunicaciones, operadores de carreteras, administradores de infraestructura ferroviaria, empresas de transporte y logística, fabricantes de vehículos y sus proveedores de equipos, fabricantes de equipos ferroviarios y emprendedores que desarrollan aplicaciones. También están centros de investigación públicos y privados, así como autoridades del área de transporte de los gobiernos nacionales y regionales de los países miembros.

Uno de estos tres proyectos se desarrollará en el corredor logístico del Mediterráneo y será ejecutado por un consorcio formado por 21 entidades de seis Estados diferentes, cuya coordinación estará liderada por empresas y centros tecnológicos catalanes (La Vanguardia, 2020).

La implementación de tecnologías de 5G y su coexistencia con la de evolución a largo plazo (LTE, por sus siglas en inglés) permitirán a Europa un importante avance en el desarrollo del proyecto de Sistemas de Transportes Inteligentes 5G (STI-5G). Su objetivo es garantizar que todas las áreas urbanas, así como las principales carreteras y ferrocarriles de Europa, tengan una cobertura 5G ininterrumpida. Esto facilitará el desarrollo de la iniciativa Movilidad Automática y Conectada, consistente en la incorporación de vehículos autónomos o conectados, que,

a través de las tecnologías de V2I y V2V, pueden guiarse sin la intervención humana gracias al despliegue de redes de comunicaciones de alta velocidad, baja latencia y grandes capacidades de transmisión de datos, que permiten la interacción de millones de automóviles al mismo tiempo (Unión Europea, 2020f; 2020e).

### **¿Qué impacto han tenido las innovaciones realizadas?**

Teniendo en cuenta que la iniciativa de la TEN-T y del STI se encuentran en desarrollo, y aunque existen evidencias de que han contribuido a reducir la huella de carbono y la congestión en las carreteras en casos específicos, se espera que el impacto sobre estos dos elementos se generalice y sean aún mayores. No obstante, esto solo será posible en la medida que haya una incorporación masiva de las tecnologías digitales y estas sean utilizadas por los diferentes actores que hacen uso de los corredores logísticos (Comisión Europea, 2018).

La digitalización también traerá mejoras en la seguridad en la medida que se incorporen servicios y aplicaciones que se están desarrollando para el reporte de siniestros de carretera (Comisión Europea, 2018).

### **¿Cuáles han sido las principales lecciones aprendidas?**

- La experiencia evidencia la necesidad de desarrollar estándares y especificaciones para garantizar la compatibilidad, interoperabilidad y continuidad de los servicios dentro de los sistemas de transporte (Comisión Europea, 2018).
- También subraya la importancia de contar con un sistema de información para el almacenamiento y la gestión unificada de datos técnicos, geográficos y financieros que permita el análisis, la gestión y la toma de decisiones relacionadas con el funcionamiento de los corredores logísticos.
- Por último, los esquemas de gobernanza que han permitido la participación de diferentes actores han demostrado ser una buena práctica que permite mejorar los resultados de la implementación de corredores logísticos, con el fin de llegar al establecimiento de acuerdos sobre objetivos comunes que satisfagan las necesidades de los diferentes grupos de interés involucrados en el desarrollo del corredor.

## Caracterización tecnológica de las experiencias analizadas

En el Cuadro 5.1 se categorizan las tecnologías utilizadas en las experiencias analizadas en los apartados anteriores.

Cuadro 5.1 — Categorización de las tecnologías utilizadas en las experiencias analizadas en el sector logístico

País y experiencia	Tecnologías empleadas	
	Tradicionales	Industrias 4.0
<b>Alemania</b> Digitalización del puerto de Hamburgo		<b>Big data y analítica de datos</b> <b>Internet de las cosas</b> <b>Nube</b>
<b>India</b> Aplicación del IdC y el <i>big data</i> para optimizar la entrega de mercancía de DHL en la India	<b>Sistema de posicionamiento geográfico (GPS)</b>	<b>Big data y analítica de datos</b> <b>Internet de las cosas</b> <b>Nube</b>
<b>Corea del Sur</b> Digitalización de las aduanas	<b>Sistema de posicionamiento geográfico (GPS)</b>	<b>Big data y analítica de datos</b> <b>Internet de las cosas</b> <b>Nube</b>
<b>Panamá</b> Digitalización de la gestión y operación del canal de Panamá y aplicación del IdC	<b>Sistemas de control y despacho navales, información de navegación, interoperatividad</b>	<b>Internet de las cosas</b>
<b>Unión Europea</b> Corredores logísticos de la TEN-T	<b>Sistema de posicionamiento geográfico (GPS)</b> <b>Identificación por radiofrecuencia (RFID)</b>	<b>5G</b> <b>Vehículos autónomos</b> <b>Automatización</b> <b>Nube</b> <b>Internet de las cosas</b>



## Matriz de análisis de las experiencias estudiadas

El Cuadro 5.2 resume los principales aspectos de las experiencias estudiadas.

En general, se encuentra que todas las experiencias internacionales estudiadas son aplicables en América Latina.

Cuadro 5.2 — Matriz con los principales hallazgos de las experiencias estudiadas

Experiencia	Problema	Solución	Impacto	Barreras	Eslabón de la cadena de valor
<b>Alemania</b> Digitalización del puerto de Hamburgo	Necesidad de realizar una mejor gestión del tráfico en las carreteras, el ferrocarril y el puerto	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Medición y control de las operaciones e infraestructuras portuarias mediante una explotación mejorada de los datos</li> <li>– Implementación del puerto inteligente a través de dos proyectos smartPORT Logistics (SPL) y smartPORT Energy</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Integración de los centros de control del tráfico (terrestre, marítimo y ferroviario) en un centro de tráfico del puerto que permite la toma de decisiones y la interacción continua con los actores que participan en las actividades de transporte</li> <li>– 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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Interacción continua entre los diferentes actores que participan en las actividades de transporte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Recepción de cargas y mercancías</li> <li>– Almacenamiento de cargas y mercancías</li> <li>– Transporte y distribución de cargas y mercancías</li> </ul>
<b>India</b> Aplicación del IdC y <i>big data</i> para optimizar la entrega de mercancía de DHL en India	El crecimiento exponencial del comercio electrónico derivó en la necesidad de reducir los costos logísticos de entrega	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Solución SmartTruck, que combina el IdC con <i>big data</i> para optimizar la operación de entrega del “último kilómetro”</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Utilización del IdC y <i>big data</i> para optimizar la operación del “último kilómetro”</li> <li>– Camiones equipados con sensores para el monitoreo de las condiciones del vehículo y la mercancía mediante GPS, dispositivos de telecomunicaciones para enviar y recibir datos y una pantalla para mostrar información relevante al conductor</li> <li>– Generación de rutas óptimas y dinámicas de entrega y recogida de mercancía; predicciones sobre las necesidades de mantenimiento de los camiones; y seguimiento del comportamiento de los conductores</li> <li>– Entrega a tiempo en un 95 %</li> <li>– Seguimiento de la mercancía 100 % en línea y en tiempo real</li> <li>– Reducción del tiempo de recorrido de hasta el 50 %</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Integración de diferentes tecnologías</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Transporte y distribución de cargas y mercancías</li> </ul>
<b>Corea del Sur</b> Digitalización de las aduanas	Necesidad de contar con un sistema de aduanas eficiente	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Simplificación de los procedimientos de autorización aduanera mediante un sistema web, 100 % electrónico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Sistemas de despacho de exportación, importación y gestión de la carga comercial basados en internet</li> <li>– Compartición de la información en tiempo real sobre el manejo de la carga con las empresas de logística</li> <li>– Reducción del tiempo y costo de procesamiento para facilitar el comercio y la seguridad de la carga</li> <li>– Seguimiento de la carga desde su llegada hasta su liberación, presentación de la declaración de aduanas en cualquier momento y lugar e intercambio de información por los miembros de la cadena de suministro global</li> <li>– Ahorros a los usuarios en términos de logística, almacenamiento de la carga, reducción de los gastos de personal e infraestructura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Interacción continua entre los diferentes actores que participan en las actividades de transporte</li> <li>– Vinculación electrónica de las partes interesadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Recepción de cargas y mercancías</li> <li>– Almacenamiento de cargas y mercancías</li> <li>– Transporte y distribución de cargas y mercancías</li> </ul>

(continúa)



Experiencia	Problema	Solución	Impacto	Barreras	Eslabón de la cadena de valor
<b>Panamá</b> 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	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Monitoreo, control y despacho de los barcos mediante de un sistema electrónico de visualización e información de la navegación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Uso del IdC con el fin de               <ul style="list-style-type: none"> <li>i) monitorear los niveles de agua, plantas hidroeléctricas y estaciones de bombeo;</li> <li>ii) monitorear y controlar el despacho de los barcos;</li> <li>iii) controlar la seguridad del canal;</li> <li>iv) controlar el despacho del ferrocarril intermodal del canal</li> </ul> </li> <li>– Utilización del sistema electrónico de visualización e información de navegación marítima (ECDIS) para el monitoreo, control y despacho de los barcos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Integración de tecnologías legadas con tecnologías orientadas a la recolección de datos que monitorean y controlan cada aspecto de la operación del canal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Recepción de cargas y mercancías</li> <li>– Almacenamiento de cargas y mercancías</li> <li>– Transporte y distribución de cargas y mercancías</li> </ul>
<b>Unión Europea</b> Corredores logísticos TEN-T	<p>Realizar el transporte de ciudadanos y mercancías de manera eficiente</p> <p>Reducir en un 60 % las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector del transporte</p> <p>Unir los sistemas de transporte de las zonas orientales y occidentales de la UE</p> <p>Reducir la dependencia del petróleo</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Desarrollo y modernización de la infraestructura de la Red Transeuropea de Transporte (TEN-T)</li> <li>– Expedición de la normatividad para la gobernanza de los corredores logísticos</li> <li>– Definición del marco normativo para la implantación de sistemas de transporte inteligentes (STI)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Disminución de la congestión en las carreteras</li> <li>– Mayor seguridad vial mediante la incorporación de servicios y aplicaciones para el reporte de emergencias</li> <li>– Integración de diferentes modos de transporte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Coordinación entre los actores y países con diferentes intereses en los corredores logísticos</li> <li>– Desarrollo de estándares y especificaciones que garanticen la interoperabilidad y continuidad de los servicios a nivel europeo</li> <li>– Definición de un sistema de información para el almacenamiento y la gestión unificada de datos técnicos, geográficos y financieros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Recepción de cargas y mercancías</li> <li>– Almacenamiento de cargas y mercancías</li> <li>– Transporte y distribución de cargas y mercancías</li> </ul>

## Identificación de buenas prácticas e impacto de los incentivos regulatorios o fiscales en la promoción y el desarrollo de las distintas iniciativas

Varios de los proyectos analizados en la comparación internacional del sector de la logística comprenden esfuerzos privados, como es el caso del puerto de Hamburgo o de los esquemas para optimizar la entrega de mercancías de DHL en India, que no requieren de incentivos regulatorios o fiscales específicos para su promoción y desarrollo.

En los otros casos analizados, se destaca la estandarización como uno de los elementos clave para la promoción y el desarrollo exitoso de la digitalización en el sector logístico y en particular en proyectos de escala continental, como la TEN-T en Europa. La experiencia parte del establecimiento de un marco para la implantación de los STI en el sector del transporte por carretera y para las interfaces con otros modos de transporte. En él se establece que los STI integran las telecomunicaciones, la electrónica y las tecnologías de la información a la ingeniería de transporte con el propósito de planear, diseñar, manejar, mantener y gestionar los sistemas de transporte. La aplicación de las TIC al transporte por carretera y sus interfaces con otros modos de transporte busca mejorar el impacto ambiental, la eficiencia energética,

la seguridad y la protección del transporte por carretera. Este último aspecto incluye el transporte de productos peligrosos, la seguridad pública y la movilidad de viajeros y mercancías. La normativa garantiza 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 o necesarias para la defensa. Uno de los propósitos clave de la directiva es la adopción de las especificaciones necesarias para garantizar la compatibilidad, interoperabilidad y continuidad de la implantación y explotación operativa de los STI. También se establecen normas relacionadas con la protección de datos y la privacidad, así como con la seguridad y reutilización de la información en el ámbito de las aplicaciones y los servicios de STI.

Por otra parte, la adopción de políticas públicas y planes estratégicos de largo plazo permitieron procesos de transformación digital de gran escala, en términos de número de agencias del gobierno y compañías conectadas. Así se ve en el proyecto de digitalización de las aduanas en Corea del Sur, que tenían como propósito central minimizar el

costo logístico y asegurar el despacho acelerado mediante la simplificación y estandarización de los procedimientos aduaneros.

En el caso del canal de Panamá se observa una práctica ejemplar, pionera en la aplicación del IdC al sector logístico en América Latina. Esa iniciativa permite que el flujo de

datos e información creado por la interconexión de diversos dispositivos que miden el comportamiento de los equipos, el uso de energía y las condiciones ambientales se pueda utilizar para mejorar su seguimiento, organización, control y gestión, lo que hace posible comunicaciones e interacciones entre máquinas o entre estas y los seres humanos.

## Caracterización del uso de las tecnologías digitales en el sector de la logística

Para establecer el uso de las tecnologías digitales en el diseño y gestión de la infraestructura del sector logístico, se parte de una conceptualización del flujo de valor en la cadena de este sector. En ella se identifican nueve tipos de procesos realizados por las empresas logísticas: procesos de embalaje, manejo de carga y descarga, transporte, almacenamiento, distribución, colaboración masiva (*crowdsourcing*)<sup>75</sup>, impresión 3D, plataformas transfronterizas y gestión de la información, como se muestra en la Figura 5.2. En ella se presentan además los flujos de materiales entre proveedores y clientes, así como los flujos de información entre las diferentes partes.

Todos estos elementos de la cadena de valor logística están experimentando transformaciones debido al cambio tecnológico. Dichas transformaciones han implicado el surgimiento del término “logística 4.0” para hacer referencia a la combinación del uso de la logística con las innovaciones y aplicaciones agregadas por sistemas ciberfísicos<sup>76</sup>. 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 aquellas que necesitan más inteligencia que los procesos automáticos o la inteligencia que puede brindar un simple producto o servicio inteligente (Barreto et al., 2017). Una logística 4.0 se apoya principalmente en las siguientes aplicaciones tecnológicas: 1) planificación de recursos, 2) sistemas de gestión de almacenes, 3) sistemas de gestión del transporte, 4) sistemas de transporte inteligentes, y 5) seguridad de la información (Barreto et al., 2017).

Por su parte, el Foro Económico Mundial (WEF, 2016b) ha identificado los siguientes aspectos centrales de la transformación digital para el sector logístico:

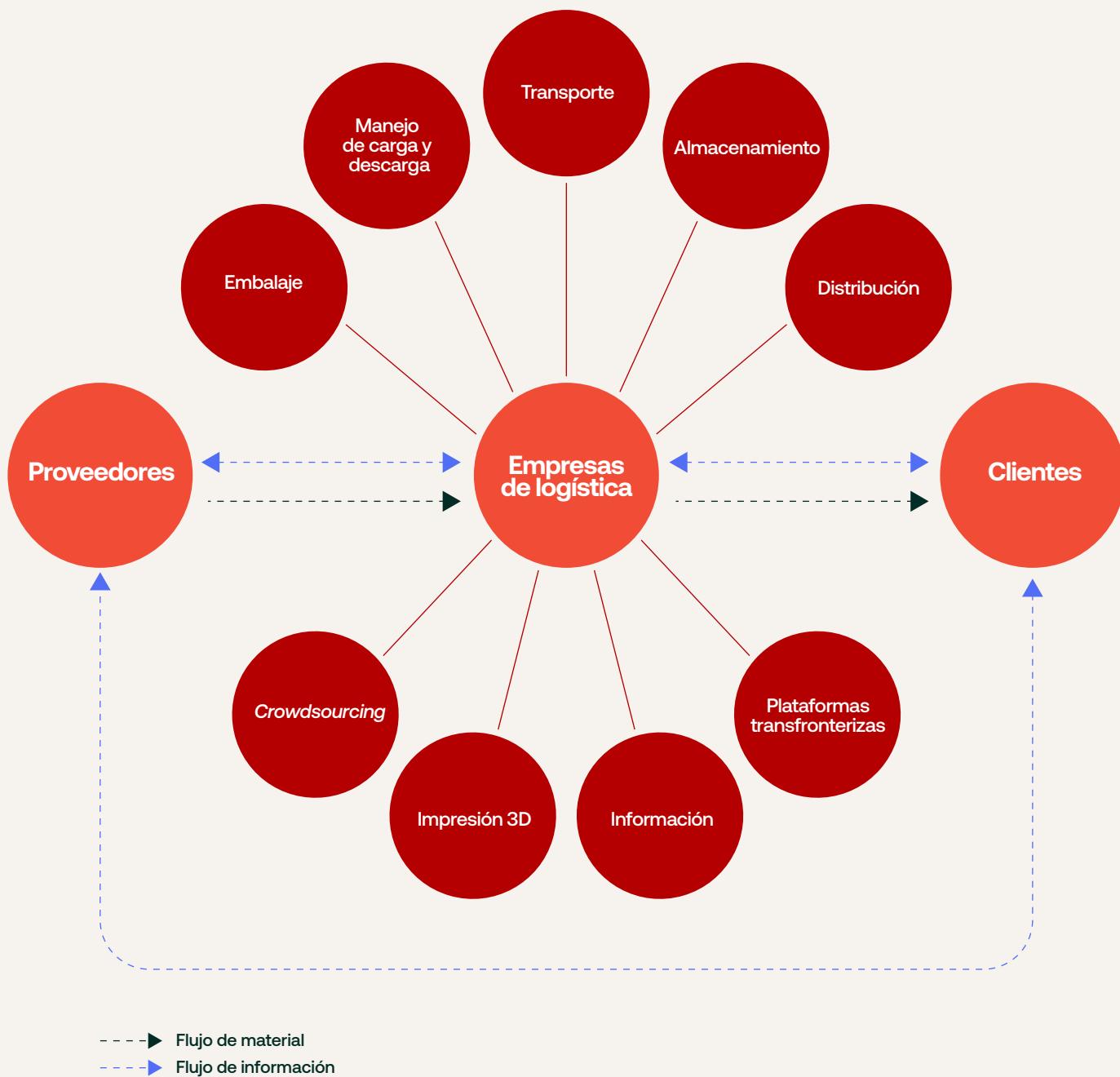
- **Servicios de información.** La utilización de los datos permite tomar decisiones informadas, incluyendo aquellas sobre iniciativas digitales, como las torres de control logístico<sup>77</sup>, que permiten el monitoreo continuo y automatizado de los elementos logísticos, desde los envíos, su trazabilidad y los activos del transporte hasta la infraestructura, los trabajadores y los requisitos de los clientes.
- **Nuevos servicios logísticos.** Con la transformación surgen nuevas ofertas en el mercado, que amplían los servicios logísticos tradicionales, como, por ejemplo, plataformas transfronterizas mejoradas digitalmente.
- **Capacidades de entrega ampliadas.** Estas consisten esencialmente en nuevos métodos de transporte físicos, como el uso de drones o vehículos terrestres autónomos (por ejemplo, camiones autónomos). Estas capacidades también hacen referencia al uso de impresión 3D y al *crowdsourcing*.
- **Capacidades de compartición en logística.** Hace referencia al surgimiento de servicios de economía compartida en partes tradicionales de la cadena logística, como el transporte y el almacenamiento.

<sup>75</sup> En logística, el *crowdsourcing* consiste en obtener lo que uno necesita de un grupo indefinido de personas, generalmente una comunidad en línea, en lugar de obtenerlo de fuentes tradicionales.

<sup>76</sup> Son sistemas físicos cuyas operaciones pueden ser monitoreadas, coordinadas, controladas e integradas por un sistema informático y de comunicaciones.

<sup>77</sup> Se trata de una plataforma que funciona como un nodo central en el que se procesan los datos y se pueden ver todos los procesos de la cadena.

Figura 5.2 — Flujos de material e información en la cadena del sector logístico



Fuente: Elaborado a partir de Zhou (2013) y WEF (2016b).

Por otra parte Arthur D Little (2017) establece cuatro categorías en la clasificación de los bloques de construcción de la logística 4.0: i) los datos, incluyendo la recolección y tratamiento de los mismos, las torres de control logísticas y la realidad aumentada; ii) nuevos métodos de transporte físico, incluidos vehículos o camiones autónomos, robots y drones; iii) mercados de plataformas digitales, donde ubican las plataformas transfronterizas mejoradas digitalmente<sup>78</sup>, las capacidades compartidas de transporte y almacenamiento, y el *crowdsourcing*; y iv) la impresión 3D.

## **Tecnologías digitales para el diseño y la gestión de la infraestructura y los activos del sector**

Existen múltiples oportunidades de mejora del uso de las tecnologías digitales para el diseño y la optimización en el sector logístico. Por ejemplo, de acuerdo con el Foro Económico Mundial, el 50 % de los camiones viajan vacíos en su retorno después de completar las entregas (WEF, 2016b).

La aplicación de la digitalización en la logística permite múltiples usos de los datos: a nivel estratégico, por ejemplo, sirven para la optimización de las rutas y modos de transporte; a nivel táctico, para la planificación diaria de recursos y activos y para la gestión y control del desempeño; y a nivel operacional, en labores como el rastreo de las entregas en tiempo real. Por supuesto, objetivos como los enunciados no son nuevos porque siempre han estado presentes en los esfuerzos de optimización de las operaciones logísticas. Sin embargo, la abundancia de datos transparentes, consistentes, holísticos (de múltiples fuentes) y en tiempo real, unido con avances tecnológicos —como las torres de control omniscientes (que brindan visibilidad de un extremo a otro de la cadena de suministro) y la inteligencia artificial— permiten pronósticos cada vez más precisos a nivel estratégico, táctico y operacional. Esos pronósticos tienen como propósito asegurar una adecuada previsión de los recursos (personas, materiales, equipos e infraestructura), que potencie su optimización o la de los procesos, para alinearse en forma oportuna con las necesidades del mercado y aumentar el empleo de activos (Arthur D. Little, 2017; Barreto et al., 2017).

De esta forma, la habilitación de plataformas digitales, por ejemplo, en los puertos marítimos, los aeropuertos y los

Como puede verse, más allá de la forma de clasificación presentada en los tres ejemplos anteriores, hay muchos elementos comunes en las visiones en torno a la logística 4.0.

A continuación, se describen las principales tecnologías de digitalización y los consecuentes cambios y transformaciones que se han venido experimentando en el sector de la logística.

corredores logísticos, permite la gestión de la carga en tiempo real, optimiza el uso de los activos en los intercambios intermodales y proporciona información útil para la planeación de las expansiones de capacidad en función de la demanda. A su vez, la digitalización de las relaciones con el Estado, como las que se derivan de procesos aduaneros, generan eficiencias en la gestión de la infraestructura (por ejemplo, menor tiempo de entrega de suministros en cadenas logísticas o de productos a los mercados finales). Por otra parte, el diseño de corredores logísticos, tales como infraestructura vial, mediante el uso de tecnologías de modelado de información de construcción (*building information modeling* o BIM) puede incrementar la productividad, mitigar errores en los proyectos y reducir los costos de inversión y operación.

Estas posibilidades han dado surgimiento al concepto de torres de control logístico, las cuales conceptualmente tienen tres niveles: i) ejecución de procesos, cuyas funciones incluyen planificación, seguimiento y rastreo del transporte, facturación, auditoría y pagos; ii) análisis, que cumple las funciones de evaluación y focalización del valor, abastecimiento y optimización, gestión del cumplimiento y análisis del desempeño; y iii) visibilidad e integración de los datos, con funciones relacionadas con el tablero de control y la generación de alarmas.

El concepto de torres de control logístico puede extenderse, con sus propias particularidades, a la gestión y monitoreo inteligente de sistemas portuarios y de corredores logísticos.

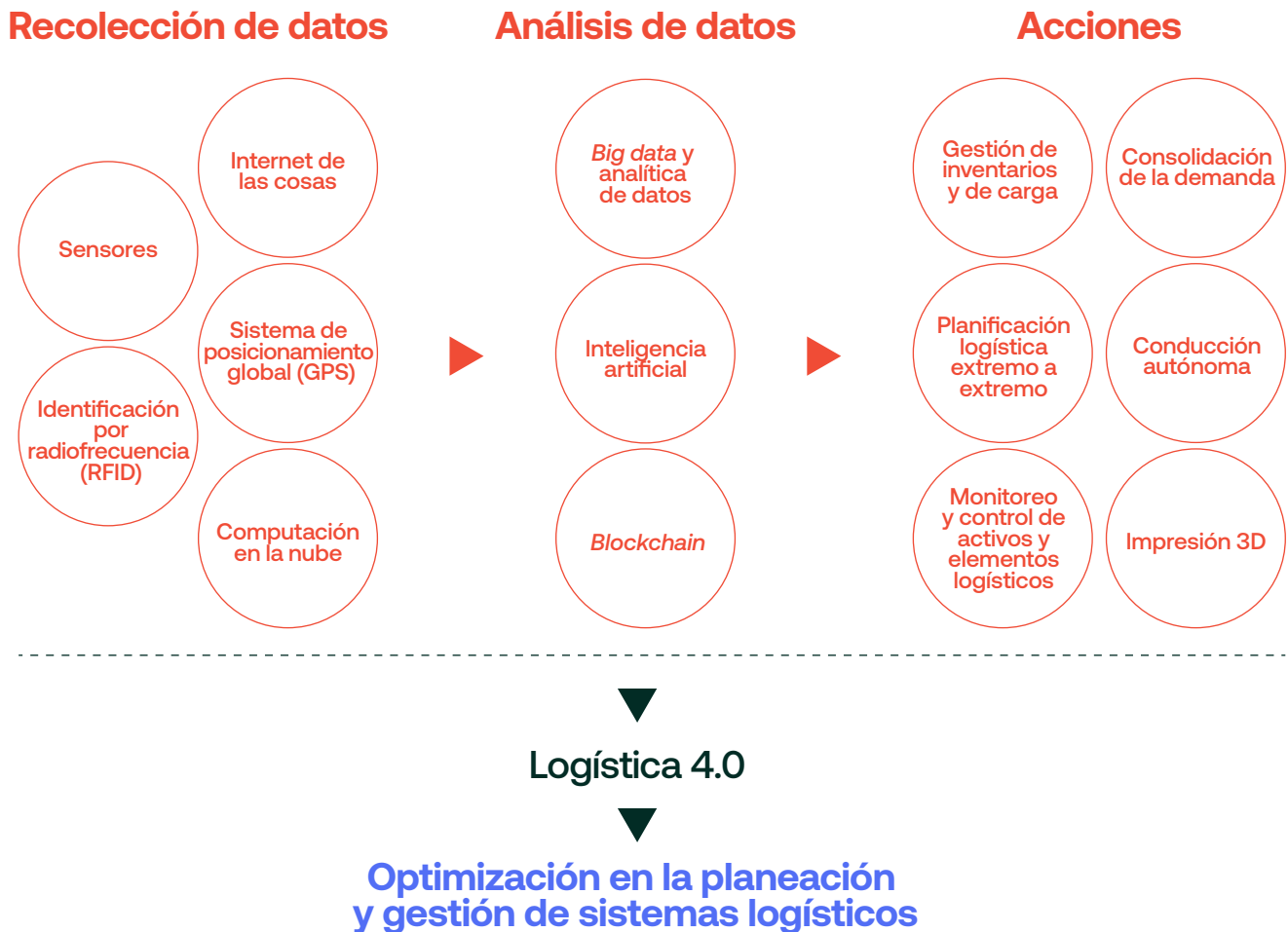
78. Las plataformas digitales transfronterizas se refieren a la incorporación de tecnologías digitales para facilitar el comercio de bienes entre países y mejorar la experiencia de los usuarios. Estas plataformas contribuyen a impulsar el comercio electrónico transfronterizo, ayudando a los diferentes grupos de interés a responder rápidamente a las cambiantes demandas de los consumidores, facilitando el intercambio de datos entre los actores que participan en los diferentes eslabones de la cadena de valor, a fin de promover el comercio, y disminuyendo la intermediación, con lo cual se reducen los costos y la complejidad de las transacciones (Accenture, 2020a; 2020b).

Los datos que se recopilan se pueden organizar en la nube con fines de seguimiento, automatización y análisis para detectar y predecir problemas y optimizar la toma de decisiones. De esta forma, generan un valor agregado en términos de altos niveles de transparencia en toda la cadena de valor y aumento en los niveles de satisfacción del cliente, puesto que ayuda a los

proveedores de logística a reaccionar de manera más flexible ante situaciones inesperadas (WEF, 2016b).

De esa forma, la digitalización permite mejorar el diseño y la planeación de los sistemas logísticos, como se ilustra en la Figura 5.3.

Figura 5.3 — Componentes para la mejora del diseño, planeación y gestión de los sistemas logísticos mediante la digitalización y la logística 4.0



## Tecnologías digitales aplicadas a las infraestructuras y los activos considerando capas de dispositivos o sensores, la recolección y el procesamiento de datos y sus aplicaciones

Los esquemas y tecnologías digitales aplicados a la infraestructura y los activos del sector logístico, vistos desde una perspectiva de capas, se presentan en la Figura 5.4.

En la parte inferior del modelo se aprecia una **capa de infraestructura**, que comprende los activos propios del sector. Estos incluyen los puertos y aeropuertos, los corredores logísticos y los activos que componen los diferentes modos de transporte terrestre vial y ferroviario (camiones, trenes y vagones), marítimo (barcos) y aéreo (aviones), mediante los cuales se desarrollan las actividades que permiten los flujos de material e información en la cadena del sector presentados anteriormente (en la Figura 5.2).

Sobre esta capa de infraestructura se puede construir una **capa de dispositivos** que actúan como sensores. Dichos dispositivos permiten medir el comportamiento de los equipos y las condiciones ambientales o facilitan la trazabilidad de los productos y mercancías desde su punto de producción, a su paso por las diferentes capas de infraestructura, hasta llegar a los clientes finales, mediante tecnologías como el IdC, los sensores de RFID o el uso extensivo de GPS. Además, existen nuevas generaciones de dispositivos que permiten la automatización de la gestión en bodegas (robots) y la entrega de mercancías (drones). También hay capas de dispositivos que están presentes directamente en la infraestructura, desde sistemas de control del tráfico con tecnología de DSRC del tipo V2I y ANPR hasta sensores y actuadores (IdC) ubicados en la infraestructura portuaria para la coordinación de los flujos de tráfico fluvial y vial y la medición de las condiciones de la infraestructura y los impactos ambientales.

## Tecnologías digitales para la desintegración de procesos y la obtención de eficiencias

En logística, existen grandes oportunidades de obtención de eficiencias en los puertos marítimos y los corredores logísticos mediante la aplicación del IdC o tecnologías más tradicionales, como la RFID, para hacer seguimiento de la carga y los activos logísticos y disminuir los tiempos en procesos como el cobro de peajes.

La introducción de plataformas digitales en partes tradicionales de la cadena logística, como el transporte y el almacenamiento, posibilita que las empresas puedan compartir la capacidad de los vehículos, usándolos simultáneamente (por ejemplo, compartiendo viajes) o definiendo un cronograma de uso en el tiempo (por ejemplo, compartiendo camiones). Esto implica la creación de plataformas donde las empresas de logística

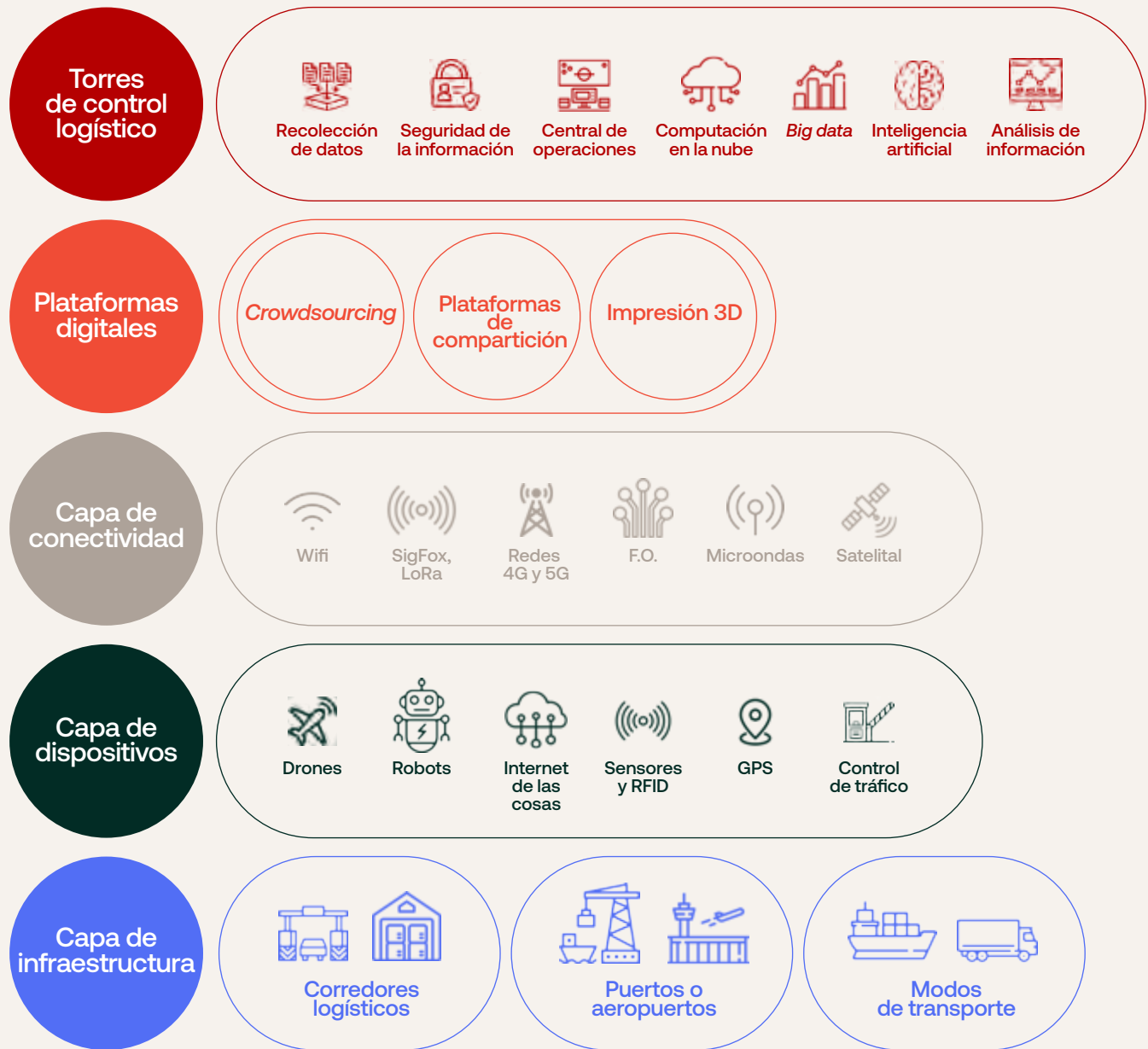
Lo más importante es que todos estos dispositivos crean datos que se comparten con otros terminales o con plataformas digitales mediante el establecimiento de **capas de conectividad**, principalmente constituidas por redes inalámbricas (4G, 5G, satélite, LoRa, wifi). De esta forma, se añade una capa de mayor inteligencia al proceso de digitalización de la infraestructura. Ello permite que el flujo de datos e información sea analizado y se convierta en un insumo clave para el desarrollo de nuevos mercados y servicios por medio de comunidades en línea; por ejemplo, mediante el *crowdsourcing* o capacidades compartidas de transporte y almacenamiento. En esta capa también se pueden ubicar las **plataformas** transfronterizas o la producción descentralizada asociada con las capacidades de entrega ampliadas (impresión 3D).

En una capa superior, se ubica el concepto de **torres de control logístico**, que, como ya se explicó, permiten el monitoreo continuo y automatizado de los elementos logísticos: infraestructura, activos, contratos y mercancías. En esta capa se puede centralizar la información proveniente de un conjunto heterogéneo de fuentes relacionadas con múltiples tipos de infraestructura, dispositivos y plataformas digitales, garantizando la seguridad de la información y realizando las funciones avanzadas de tratamiento de los datos, incluyendo centrales de operaciones para el control en línea de activos y mercancías y capacidades avanzadas de analítica, mediante aplicaciones de *big data* e inteligencia artificial.

puedan compartir información sobre activos, rutas y tasas de uso. En el caso del almacenamiento, la compartición de bodegas mitiga el riesgo de las empresas de tener una gran base de costos fijos y facilita llevar a cabo la consolidación de pedidos y distribución en varias ubicaciones, en lugar de solo en una, proporcionando una mejor relación costo-servicio y reduciendo los kilómetros recorridos hasta la entrega final.

Por otra parte, la cadena de bloques ofrece un gran potencial para mejorar procesos de la industria logística (Niels y Mortiz, 2017) en elementos como el costo, la calidad, la reducción de riesgos y la flexibilidad, así como en los problemas de trazabilidad del producto y las falsificaciones. Sin embargo, su nivel de adopción aún es incipiente (Queiroz y Fosso, 2019).

Figura 5.4 — Esquemas y tecnologías digitales aplicados a la infraestructura y los activos del sector logístico



## Valor agregado y potencial de desarrollo de nuevos servicios

La digitalización en el sector logístico tiene potencial para el desarrollo de varias categorías de nuevos servicios:

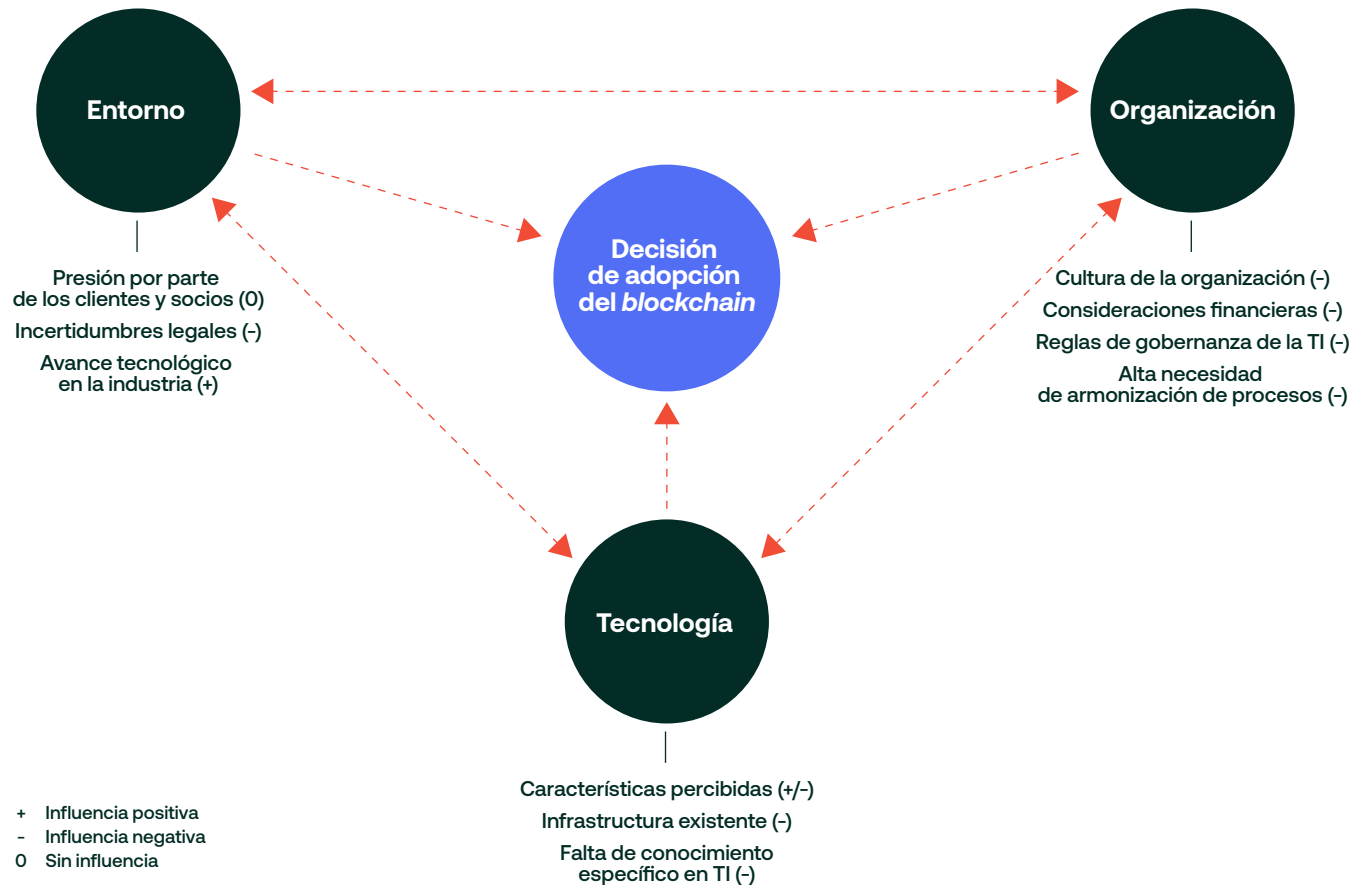
- i) innovaciones en los métodos de transporte físico;
- ii) nuevos métodos de producción; iii) plataformas digitales; y
- iv) aplicaciones de cadenas de bloques.

Las innovaciones en los métodos de transporte físico implican el uso de nuevas tecnologías, como los drones o los vehículos terrestres no tripulados. Los drones de entrega pueden permitir el reparto a domicilio, al sitio preciso de ubicación de los clientes, si se cuenta con los datos de geolocalización correctos. A su vez, los camiones no tripulados,

que se encuentran todavía en una fase experimental, podrían beneficiarse del establecimiento de infraestructura en corredores logísticos para vehículos autónomos.

Los nuevos métodos de producción hacen referencia al uso de la impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva en capas, que permite la creación de objetos sólidos tridimensionales a partir de planos digitales. Esta innovación podría facilitar, por ejemplo, que un proveedor de servicios de logística reciba los planos, imprima el producto y lo envíe a un cliente cercano, quizás incluso instalando el objeto final en la ubicación del cliente.

Figura 5.5 — Factores que influyen la adopción del *blockchain* en logística



Fuente: Tomado de Kühn et al. (2019)



Las plataformas digitales incluyen el *crowdsourcing*, cuya aplicación en el caso del sector logístico permitiría hacer un uso más eficiente de la capacidad disponible (por ejemplo, mediante el establecimiento de una red de vehículos de carga de muchos proveedores diferentes). Esto facilitaría el establecimiento de modelos de negocio libres de activos fijos, pero también que empresas logísticas pequeñas mejoren el nivel de utilización de sus propios activos al acceder a un mercado mayor. Otra modalidad de nuevos servicios en esa categoría corresponde a las plataformas transfronterizas mejoradas digitalmente, en las cuales los socios del servicio que apoyan las plataformas pueden gestionar los trámites de aduana, el embalaje internacional y los pagos de importación, de manera que los artículos se puedan enviar a los compradores internacionales con un seguimiento completo de un extremo a otro de la cadena.

En el caso de la industria logística, la cadena de bloques ofrece un gran potencial para la ampliación de los modelos de negocio en logística y la gestión de cadenas de suministro (Niels y Mortiz, 2017). De hecho, existen varios casos de uso que han sido analizados respecto a la forma como el *blockchain* puede ser utilizado en aplicaciones de logística y que comprenden tres grandes áreas: despacho y gestión aduanera; digitalización y facilitación del papeleo; y seguimiento y localización, aunque los

desarrollos todavía son incipientes (Yang, 2019). Esta tecnología también puede ser utilizada para realizar el rastreo de los productos dentro de las cadenas de producción y suministro. Otra opción surge en algunas implementaciones del *blockchain* que admiten los llamados “contratos inteligentes”, que son condiciones escritas en código. En el caso de la logística, la entrega de un paquete puede servir como un ejemplo simple: para contrarrestar el riesgo de pérdida, se puede diseñar un contrato inteligente de modo que el pago por parte del remitente solo se libere una vez que la empresa de envío confirme la entrega. Esto permite automatizar una transacción, pero también documentarla y controlarla (Niels y Mortiz, 2017).

Como en cualquier proceso de adopción tecnológica, existen factores neutros o que influyen positiva o negativamente a la digitalización de la logística. En el caso de las cadenas de bloques aplicadas a este sector, un análisis realizado en Alemania en 2019 encontró resistencias a su adopción tanto a nivel organizacional como de sus capacidades, como se muestra en la Figura 5.5 (Kühn et al., 2019).

En el Cuadro 5.3 se presenta un resumen con las tecnologías, los nuevos negocios y servicios que permitirá la digitalización, así como los incentivos que la impulsarán en el sector de la logística.

**Cuadro 5.3 — Tecnología, nuevos negocios y servicios que promoverán la digitalización del sector logístico**

<b>Tecnología</b>	<b>Nuevos negocios o servicios</b>	<b>Impactos esperados</b>
Sistemas inteligentes de transporte y comunicación entre vehículos y entre estos y la infraestructura (V2V y V2I)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Control del flujo de velocidad</li> <li>– Peajes electrónicos en corredores logísticos</li> <li>– Generación de alertas para la prevención de siniestros</li> <li>– Control de rutas</li> <li>– Control y trazabilidad de los recursos (cargas, mercancías y personas)</li> <li>– Control de llegada y salida de los modos de transporte (drones, trenes, camiones, aviones y barcos, etc.)</li> <li>– Vehículos autónomos (drones, trenes, camiones, aviones y barcos, etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Reducción de la siniestralidad</li> <li>– Disminución de la congestión vehicular</li> <li>– Reducción de la huella de carbono</li> <li>– Estandarización de las tecnologías</li> <li>– Reducción de los costos de operación logística</li> <li>– Facilidad de acceso a las redes de telecomunicaciones</li> </ul>
IdC, identificadores digitales y sensores	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Trazabilidad de las cargas y mercancías a lo largo de toda la cadena logística</li> <li>– Automatización de los procesos</li> <li>– Automatización de las bodegas</li> <li>– Puertos inteligentes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Facilidad de acceso a las redes de telecomunicaciones</li> <li>– Mitigación de riesgos asociados con el traslado de las cargas</li> <li>– Reducción de la variabilidad en los tiempos de entrega</li> </ul>
Automatización	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Automatización de los procesos</li> <li>– Automatización de las bodegas</li> <li>– Puertos inteligentes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Reducción de los costos de operación logística</li> </ul>
Impresión 3D	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Producción descentralizada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Reducción de los costos de operación logística</li> </ul>
<i>Blockchain</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Desintermediación financiera</li> <li>– Despacho y gestión aduanera</li> <li>– Digitalización de los documentos</li> <li>– Contratos electrónicos</li> <li>– Transacciones digitales</li> <li>– Trazabilidad de las cadenas de producción y de suministro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Formalidad de la actividad logística</li> </ul>

# Identificación de los costos de la digitalización en el sector logístico

Para cada una de las capas presentadas en la Figura 5.4, se pueden identificar los equipos y aplicaciones descritos en el apartado anterior, los cuales determinan los costos incrementales de CAPEX y OPEX que conlleva la digitalización de la infraestructura y los activos funcionales del sector de la movilidad. Estos costos incrementales se establecen a partir de los componentes de digitalización y las funcionalidades que se implementarán en las infraestructuras. Los diseños técnicos y trabajos de ingeniería detallados permiten determinar los costos y cronogramas de implementación requeridos para cumplir con los objetivos y las proyecciones

de la demanda del proyecto. Los costos detallados de los equipos o aplicaciones específicos a utilizar en un proyecto dependen de múltiples variables, desde las especificaciones técnicas hasta la selección del fabricante, pasando por factores que influyen los precios, como el país donde se pone en marcha y las economías de escala y alcance del proyecto. Considerando lo anterior, en el Cuadro 5.4 se identifican los equipos, aplicaciones, funcionalidades y principales factores que determinan el costo de los diferentes componentes en cada una de las capas de los proyectos en este sector.

**Cuadro 5.4 — Equipos, aplicaciones, funcionalidades y determinantes de costos (CAPEX y OPEX) para la digitalización de los proyectos de infraestructura del sector logístico**

Equipo o aplicación	Funcionalidades	Determinantes de costos
<b>Capa de dispositivos</b>		
Sensores (en la infraestructura de carreteras, los vehículos, el IdC, la RFID, el GPS y otros)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Generación de información para alertar a los conductores sobre el estado de las vías</li> <li>– Comunicación del tipo V2I y V2V</li> <li>– Introducción de funciones de conducción automática</li> <li>– Control de rutas</li> <li>– Introducción de peajes electrónicos</li> <li>– Digitalización de nodos intermodales</li> <li>– Generación de alertas para la prevención de siniestros</li> <li>– Ubicación y monitoreo de los vehículos (trenes, camiones, aviones, barcos, etc.)</li> <li>– Control y trazabilidad de los recursos (vehículos, cargas, mercancías y personas)</li> <li>– Comunicación con sistemas de información geográfica (GIS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Carreteras o corredores logísticos donde se implementarán los sistemas V2I</li> <li>– Cantidad de peajes electrónicos o puntos de control en los corredores logísticos</li> <li>– Parque vehicular logístico (trenes, camiones, aviones y barcos)</li> <li>– Cantidad de vehículos con funcionalidades de conducción autónoma</li> <li>– Vías donde se implementarán los sistemas de conducción autónoma (carreteras, fluviales, ferroviarias)</li> <li>– Cantidad de centros intermodales</li> <li>– Cantidad de bodegas</li> <li>– Capacidad de carga de los puertos fluviales y marítimos y de los centros intermodales</li> <li>– Capacidad de almacenaje de las bodegas</li> </ul>
Dispositivos dedicados de comunicaciones (DSRC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Control y trazabilidad de los recursos (cargas, mercancías y personas)</li> <li>– Introducción de funciones que permiten conocer información relativa a la posición, dirección, velocidad y otros datos de interés de los vehículos</li> <li>– Seguimiento de la carga a lo largo de la cadena logística</li> <li>– Digitalización de los nodos intermodales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cantidad de contenedores, palés o mercancías que incorporan el seguimiento de carga</li> <li>– Cantidad de parqueaderos de camiones</li> </ul>
Reconocimiento automático del número de matrícula (ANPR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Identificación de las placas de los vehículos</li> <li>– Ubicación y monitoreo de los camiones</li> <li>– Control de llegada y salida de los camiones</li> <li>– Digitalización de los nodos intermodales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cantidad de peajes electrónicos o puntos de control en los corredores logísticos</li> <li>– Parque automotor logístico</li> <li>– Carreteras donde se implementarán controles de velocidad</li> <li>– Sitios donde se implementarán mecanismos de control de salida y llegada de vehículos (nodos intermodales, centros de almacenamiento, bodegas, otros)</li> </ul>

(continúa)

Equipo o aplicación	Funcionalidades	Determinantes de costos
Equipos de control y acceso a los usuarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Autenticación y control del acceso de personas y vehículos a zonas restringidas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Parque vehicular logístico</li> <li>– Cantidad de centros intermodales</li> <li>– Cantidad de bodegas</li> <li>– Cantidad de sitios con acceso restringido (nodos intermodales, centros de almacenamiento y demás puntos de carga y descarga de grandes volúmenes de mercancías, otros)</li> <li>– Cantidad de usuarios con acceso autorizado a nodos intermodales, centros de almacenamiento, bodegas y demás sitios con acceso restringido</li> </ul>
Cámaras de monitoreo	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Prevención y detección de actos criminales asociados con el robo de productos o mercancías en vehículos o lugares de almacenamiento</li> <li>– Reconocimiento facial y de las placas para evitar el acceso a zonas restringidas de personas o vehículos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Parque vehicular logístico (trenes, camiones, aviones y barcos)</li> <li>– Cantidad de nodos intermodales, centros de almacenamiento, bodegas y demás sitios con acceso restringido</li> <li>– Número de cámaras por nodos, centros o bodegas</li> <li>– Características técnicas de las cámaras de monitoreo</li> </ul>
Robots	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Automatización de los procesos de la cadena de valor logística</li> <li>– Automatización de las bodegas</li> <li>– Automatización de los nodos intermodales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cantidad de centros intermodales</li> <li>– Cantidad de bodegas</li> <li>– Cantidad de vehículos logísticos esperados en los centros intermodales y lugares de almacenamiento</li> <li>– Capacidad de almacenaje</li> <li>– Volumen de mercancías que se entrega por día</li> <li>– Nivel o porcentaje de robotización por sitio</li> <li>– Características de los robots</li> </ul>
Drones	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Vigilancia de los centros de almacenamiento, nodos intermodales, etc.</li> <li>– Transporte de cargas y mercancías</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cantidad de centros intermodales</li> <li>– Cantidad de bodegas</li> <li>– Capacidad de almacenaje</li> <li>– Volumen de mercancías que se entrega por día</li> <li>– Distancia y peso promedio de las entregas</li> <li>– Características de los drones</li> </ul>
Dispositivos para el reporte de emergencias	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Reporte de incidentes en los corredores logísticos</li> <li>– Reporte de incidentes en las vías públicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Parque vehicular logístico</li> <li>– Cantidad de centros intermodales</li> <li>– Cantidad de bodegas</li> <li>– Cantidad de puntos de reporte de emergencias que se instalarán en las vías</li> </ul>

## Capa de conectividad

### Redes propias

Estaciones base	Redes y protocolos de comunicaciones a través de los cuales se transmite la información que permite la localización de vehículos tripulados y no tripulados, la vigilancia, el control y la gestión de rutas y los servicios de comunicaciones para la operación logística	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Áreas geográficas</li> <li>– Tecnologías utilizadas</li> <li>– Parque vehicular logístico (trenes, camiones, aviones y barcos)</li> <li>– Cantidad de nodos intermodales, centros de almacenamiento y bodegas</li> <li>– Otras ubicaciones con dispositivos que requieran transmitir información</li> <li>– Periodicidad de transmisión de la información</li> <li>– Volumen de datos generados por los dispositivos desplegados</li> <li>– Servicios que prestarán a través de las redes desplegadas (voz o datos)</li> <li>– Ancho de banda requerido para la transmisión de servicios de voz y datos</li> <li>– Tráfico máximo de voz y datos que se cursará por la red</li> <li>– Bandas de frecuencia de espectro radioeléctrico utilizadas (libres o licenciadas)</li> <li>– Niveles de calidad y servicios requeridos</li> </ul>
Fibra óptica		
Enlaces microondas		
Enlaces satelitales		
Otros equipos de comunicaciones		

(continúa)

Equipo o aplicación	Funcionalidades	Determinantes de costos
<b>Redes de terceros</b>		
Contratación de servicios de telecomunicaciones (voz o datos, canales dedicados u otros)	Servicios contratados de telecomunicaciones para transportar las señales desde los dispositivos de medición y control hasta los centros de operación logísticos y viceversa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Áreas geográficas donde se requerirá la prestación de los servicios</li> <li>- Parque vehicular logístico</li> <li>- Cantidad de centros intermodales</li> </ul>
Arrendamiento de infraestructura	Arrendamiento de infraestructura de terceros para la instalación o despliegue de equipos que transportan las señales desde los dispositivos de medición y control hasta los centros de operación logísticos y viceversa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cantidad de bodegas</li> <li>- Cantidad de dispositivos que serán conectados a la red</li> <li>- Tráfico máximo de voz y datos que se cursará por la red</li> <li>- Tarifas de los servicios de voz y datos</li> <li>- Niveles de calidad y servicios requeridos</li> <li>- Cantidad y elementos de infraestructura que se arrendarán</li> <li>- Tarifas de arrendamiento (torres, espacios físicos, etc.)</li> </ul>
<b>Plataformas digitales</b>		
Impresoras 3D	Equipos y aplicaciones que permiten la impresión de objetos sólidos tridimensionales a partir de planos digitales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puntos de impresión 3D</li> <li>- Cantidad de impresoras 3D por punto de impresión</li> </ul>
<b>Big data, analítica de datos y crowdsourcing (logística en la nube)</b>		
Equipos de cómputo o computación en la nube (servidores, sistemas de almacenamiento)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Control de los dispositivos (sensores, IdC, identificadores digitales, robots, drones, etc.)</li> <li>- Procesamiento de los datos generados por los diferentes dispositivos y sensores con el fin de utilizarlos en la optimización de diferentes procesos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Parque vehicular logístico</li> <li>- Tipo y número de agentes involucrados en el sistema logístico</li> <li>- Cantidad de centros intermodales</li> <li>- Cantidad de bodegas</li> </ul>
<i>Software</i> y aplicaciones para el procesamiento de datos e imágenes, el control de dispositivos, la compartición de la cadena logística, la digitalización de aduanas, el <i>crowdsourcing</i> (logística en la nube), el control de la impresión 3D, el <i>blockchain</i> y la ciberseguridad	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Toma de decisiones para el control de cargas y mercancías</li> <li>- Seguimiento y localización de las cargas y mercancías</li> <li>- Planeación dinámica de las rutas y los modos de transporte</li> <li>- Desarrollo de plataformas digitales para la compartición de recursos de la cadena logística, tales como los de transporte y almacenamiento</li> <li>- Digitalización de los procesos aduaneros</li> <li>- Digitalización de los documentos y trámites electrónicos que facilitarán el desarrollo de la cadena de bloques (elaboración y suscripción de contratos digitales y realización de transacciones electrónicas)</li> <li>- Garantía de integridad, confidencialidad y disponibilidad de los datos</li> <li>- Encriptamiento y garantía de la privacidad de la información</li> <li>- Prevención de los ataques que amenacen la seguridad e integridad de los sistemas informáticos utilizados para gestionar los procesos que se dan en los diferentes eslabones de la cadena logística</li> <li>- Reconocimiento facial y de placas para la identificación de personas o vehículos</li> <li>- Procesamiento de las imágenes para prevenir y evitar el acceso a zonas restringidas</li> <li>- Prevención y detección de actos criminales asociados con el robo de productos o mercancías en vehículos o lugares de almacenamiento</li> <li>- Prevención y detección de incidentes en las carreteras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cantidad de datos generados</li> <li>- Cantidad de centros de monitoreo y control de operaciones</li> <li>- Velocidad de procesamiento y análisis de la información</li> <li>- Licencias de aplicaciones para el control de dispositivos</li> <li>- Licencias de aplicaciones para el control de robots</li> <li>- Licencias de aplicaciones para el control y programación de drones</li> <li>- Licencias de aplicaciones para la digitalización de los trámites aduaneros</li> <li>- Licencias de los controladores de impresión 3D</li> <li>- Desarrollo del <i>blockchain</i></li> <li>- Cantidad de transacciones</li> <li>- Documentos para la legalización aduanera</li> <li>- Capacidad de los puertos y centros intermodales</li> <li>- Licencias de aplicaciones de procesamiento (<i>big data</i>, analítica de datos, inteligencia artificial, otras)</li> <li>- Licencia de aplicaciones de ciberseguridad</li> <li>- Cantidad de usuarios con permiso de acceso a lugares restringidos</li> <li>- Licencias para el control de elementos de seguridad</li> </ul>

# Identificación de los beneficios de la digitalización del sector logístico

En esta sección se resumen los principales beneficios económicos asociados con la digitalización de las cadenas de suministro y los procesos logísticos.

## Ahorros en los costos de transporte

### ¿Cómo incide la digitalización de las cadenas de suministro en los costos de transporte?

La digitalización de estas cadenas permite optimizar constantemente las rutas y los modos de transporte de las materias primas y los productos terminados. El manejo de información digitalizada en tiempo real de fletes, capacidad y tiempos de viaje en cada una de las posibles rutas, modos y puntos de transferencia por los que pasa determinado producto entre un origen y un destino permite soportar las decisiones en algoritmos de optimización. Un sistema de monitoreo del estatus de la totalidad de los flujos de carga que se movilizan en el corredor y en los nodos de intercambio modal permite coordinar y optimizar las operaciones en cada eslabón.

Las cadenas digitales de suministro, además, facilitan el desarrollo de relaciones contractuales basadas en registros digitales para compartir infraestructura y equipos de transporte con una variedad de operadores logísticos. Esta posibilidad habilita funciones como la consolidación de la carga y la distribución urbana en vehículos con las dimensiones óptimas en función de la demanda (Holmgren, 2018)<sup>79</sup>.

Por otra parte, el despliegue de un sistema electrónico de peajes que reduzca el tiempo de tránsito de los camiones de carga en los puntos de cobro puede recortar considerablemente los tiempos de viaje y con ello aumentar la eficiencia en el uso del capital.

Finalmente, las mejoras asociadas con la digitalización en el manejo de bodegas y la programación de carga e itinerarios se pueden traducir en menores tiempos muertos de los camiones

(lucro cesante) tanto en la asignación de carga como en los procesos de carga y descarga.

### ¿Cómo se evalúan los beneficios económicos asociados con la reducción en los costos de transporte?

Se trata de comparar los costos de transporte de las materias primas y los productos terminados en las situaciones con proyecto y sin él. En primer lugar, se debe definir el alcance de la digitalización de las cadenas de suministro que cubre el proyecto. En efecto, el proyecto puede estar limitado a una empresa, un grupo de empresas, un corredor, una región o a nivel nacional.

Si el proyecto tiene un alcance a nivel corredor, de región o de todo el país, idealmente se debe construir una línea de base en un modelo de transporte. En este modelo se consideran los volúmenes transportados entre cada par origen-destino y los costos implícitos para cada tramo y agregados para las rutas actuales y la utilización del parque. En la línea de base se debe estimar los costos de transporte con herramientas como el HDM-4 del Banco Mundial<sup>80</sup>, considerando la participación en la carga de cada tipo de camión, la capacidad utilizada de los vehículos (ocupación media, el porcentaje de viajes en vacío) y las rutas utilizadas.

Posteriormente, se alimenta el modelo con los parámetros de eficiencia que se espera que genere la digitalización en términos de intensidad del uso de la flota de carga, optimización de las rutas y reducción de los tiempos de espera en los puntos de peaje, en los procesos para la asignación de carga, las actividades de carga y descarga y por la optimización de las rutas.

<sup>79</sup> El estudio de Holmgren, por ejemplo, reporta los resultados de un piloto en el que tres grandes operadores debían separar carga en un terminal. Se recogió información del origen y destino de la carga, los tiempos en bodega, los tiempos de espera y de carga y descarga, el tipo de vehículo, el número de paradas, la carga (t) y la hora del día. En el estudio se obtuvieron los siguientes resultados: reducción en el número de vehículos de entre el 20 % y el 30 %; incremento en la utilización del vehículo del 47 %; reducción en el tiempo de respuestas para entregas del 54 %; reducción en la distancia manejada del 50 %; reducción en el número de paradas del 43 %.

<sup>80</sup> El HDM-4 exige la parametrización específica con los costos que se evalúan en el proyecto y para cada tipología de vehículos de carga: el costo de los camiones, el diésel, las llantas, los lubricantes, el mantenimiento, los peajes, el salario del conductor y otros costos fijos. Además, es necesario considerar la relación entre los fletes del mercado y los costos simulados en cada ruta en función del grado de descampensación en los flujos de carga.

La comparación de los costos generalizados de transporte en las situaciones con y sin proyecto constituye una estimación de los beneficios económicos por la reducción en los costos de transporte de carga.

## Ahorros en el almacenamiento

### ¿Por qué la digitalización de las cadenas logísticas puede reducir los costos de 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 alrededor de los tiempos de entrega de la materia prima y el producto final. En efecto, la digitalización habilita alternativas para el movimiento de la carga que permiten gestionar eventuales contingencias que afecten los procesos de abastecimiento y distribución. Los responsables de la logística en las empresas pueden reaccionar permanentemente ante reducciones o acumulaciones excesivas del inventario.

La incertidumbre, por su parte, es una de las variables consideradas en la optimización del volumen de los inventarios. El inventario debe ser suficiente para cubrir eventos aleatorios de interrupción en la cadena de suministro, de forma que se eviten los costos de parar la producción o dejar de honrar los contratos de entrega del producto final. Por ello, si se reduce el grado de incertidumbre es posible operar con niveles menores de inventarios.

Otro factor con incidencia en el nivel de inventarios inducido por la digitalización es la mejor previsión de la demanda. La analítica de datos, el *big data*, el aprendizaje automático y la IA permiten identificar patrones de consumo, con lo cual es posible anticipar los volúmenes de demanda de un ítem específico en determinada localidad. Esta información permite, a su vez, optimizar la programación del abastecimiento, la producción y distribución de mercancías, lo que puede redundar en un menor nivel de inventarios.

La digitalización, además, facilita los contratos para compartir infraestructura de almacenamiento con firmas aliadas e incluso competidores. Compartir capacidad de almacenamiento requiere el intercambio de información digital entre organizaciones, considerando la interconectividad en las diferentes capas de gobierno, los procesos y la gestión administrativa (Kayikci, 2018). La compartición de capacidad de almacenamiento permite elevar los índices de utilización de las bodegas y con ello diluir los costos fijos.

Si el proceso de digitalización de las cadenas logísticas se plantea a nivel empresa, el análisis debe contemplar, a partir de las proyecciones del formulador del proyecto, la reducción en el número de vehículos requeridos gracias a la mayor intensidad de uso (veh./km/año), la reducción de los viajes en vacío, la menor distancia recorrida y la reducción en el número de paradas.

### ¿Cómo se valoran los beneficios por menores costos de almacenamiento?

A continuación, se discute la aproximación metodológica para medir los beneficios por los menores costos de almacenamiento.

#### 1 Menor costo en pago de bodegas:

- Si las bodegas son contratadas con terceros, la digitalización se traduce en una reducción en el pago de tarifas de almacenamiento o en las cuotas de arrendamiento, según sea el caso.
- Si el almacenamiento lo lleva a cabo la empresa en sus propias bodegas, se debe considerar una reducción en el costo de capital y en los costos operativos asociados a la infraestructura de almacenamiento.
- Para proyectos con alcance de corredor regional o nacional de los que se beneficie un gran número de empresas, es posible imputar un costo promedio de almacenamiento, estimado para cada país a partir de las cuentas nacionales o de estudios específicos del sector logístico.

2 Menor costo financiero por inventarios de materia prima y producto terminado. Mantener inventarios de materia prima o producto final exige capital de trabajo y este, por su parte, enfrenta un costo financiero. La reducción de inventarios, entonces, genera un beneficio equivalente a la tasa de interés relevante de quien gestione los inventarios multiplicada por la reducción en el valor del inventario. Para su estimación, es necesario calcular el valor del inventario, su variación atribuible al proyecto y el costo del capital que enfrenta quien realiza el proyecto. Se puede utilizar como proxy la tasa del activo preferencial del sistema financiero en el país donde se ejecuta el proyecto. El valor de los inventarios, por su parte, se puede obtener a partir de un promedio ponderado del valor de los flujos del comercio considerados en el corredor.

## Menor incertidumbre sobre los tiempos de entrega

### ¿Cómo reduce la digitalización de la logística la variabilidad en los tiempos de entrega?

El monitoreo permanente de la localización y el estado de la carga permite anticipar eventuales cuellos de botella y tomar decisiones que minimicen los retrasos en las cadenas de suministro. Con la gestión de las cadenas digitales de suministro, se reduce la variabilidad en los tiempos de recepción de la materia prima y en los despachos del producto terminado.

Además, como se mencionó en el apartado anterior, las herramientas de analítica de datos habilitadas por la digitalización de las cadenas de suministro permiten mejorar las predicciones de la demanda y con ello anticipar las necesidades de inventario de los clientes en las cercanías, lo que reduce los tiempos de espera.

## Reducción de las pérdidas de mercancía (daños)

### ¿Por qué la digitalización de la logística permite reducir los índices de deterioro de mercancías?

Algunos sensores cuentan con dispositivos con la capacidad de reportar condiciones que afectan la integridad del producto, como temperatura, humedad, impactos, etc. Cuando la infraestructura digital en las cadenas logísticas captura, almacena y procesa la información transmitida por estos sensores, es posible monitorear en tiempo real el estatus de las mercancías y asignar las responsabilidades de eventuales deterioros entre los agentes de la cadena. La información, además, permite establecer las causas de los deterioros y tomar las medidas correctivas necesarias, con lo cual, a futuro, los índices de mercancía desechada disminuyen.

### ¿Cómo se valoran los beneficios por un menor deterioro en las mercancías?

Para determinar el valor de la mercancía cuyo deterioro se evita gracias al proyecto es necesario estimar la probabilidad de daño en la situación sin proyecto y con él y calcular la diferencia en probabilidades. Esta diferencia se aplica al valor de la mercancía movilizadora en el período de análisis para obtener una estimación del beneficio económico de la digitalización por este concepto.

### ¿Cómo se valoran los beneficios por menor incertidumbre en los tiempos de entrega?

Una forma de aproximar metodológicamente los beneficios por reducir la variabilidad en los tiempos de entrega es cuantificar las sanciones evitadas por incumplimiento en las fechas de entrega. Este parámetro se podría obtener de un análisis de mercado entre operadores de carga, quienes cobran una tarifa adicional por anticipar la entrega de los pedidos, o mediante el análisis de las compensaciones contractuales por incumplimiento de las fechas pactadas en las relaciones comerciales.

Alternativamente, si se cuenta con recursos para emprender una investigación especializada, se podría plantear una metodología de valoración contingente para, mediante una encuesta, estimar el impacto en la utilidad de los consumidores de las entregas puntuales. Otra opción es calcular la desutilidad que genera recibir con retraso bienes o servicios previamente adquiridos. En este último caso se consultaría a los encuestados su disponibilidad a aceptar diferentes niveles de compensación por sufrir retrasos en la entrega de los productos.

La estimación anterior se puede considerar como un piso de los beneficios estimados. En la práctica, la devolución de productos defectuosos genera costos adicionales, tales como el transporte y la logística que implica reponer el producto y eventuales pagos de sanciones por incumplir con la calidad contratada en la transacción. Se han construido modelos teóricos con aplicaciones prácticas para medir la relación beneficio-costos a partir de la utilidad que obtienen los agentes en la cadena de suministro por implementar sistemas digitales de monitoreo del producto con tecnología de código de barras o RFID y tecnologías más avanzadas de sensores (nodos de sensores inalámbricos y artículos inteligentes avanzados) (Decker et al., 2008). En un estudio de caso para un productor de manzanas se muestra que migrar a tecnologías avanzadas de monitoreo del producto arroja ganancias al productor y al transportador.

## Ahorros en el manejo interno de los productos

### ¿Por qué la digitalización de la logística aumenta la eficiencia en la gestión de la carga en bodegas y los puntos de intercambio modal?

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. El flujo de información de compras, ventas y disponibilidad de medios de transporte y espacio de almacenamiento permite optimizar el programa de despacho, recepción y ubicación de cada lote de productos (palés, contenedores, tanques, etc.) en los patios y las bodegas. Los equipos autónomos, alimentados con este flujo de información, permiten gestionar las bodegas y las operaciones de carga y descarga con mayor eficiencia, minimizando los requerimientos de recursos humanos. Con la expansión del comercio electrónico, aumenta exponencialmente el número de envíos y las exigencias en la organización y gestión de la logística para manejar las ventas en un espectro enorme

## Conectividad global para organizaciones de gran tamaño (productor-detallista)

### ¿Por qué la digitalización en la cadena de suministro permite penetrar nuevos mercados?

Las grandes organizaciones ya han desplegado sus cadenas digitales de suministro. Estas cadenas les permiten, mediante contratos de uso compartido de infraestructura y equipos de transporte y almacenamiento, llevar sus productos a cualquier localización en el mundo y organizar el suministro considerando las ventajas competitivas de cada región. Como se ha dicho, la digitalización facilita el monitoreo, ejecución, facturación y pagos de un gran número de contratos con transportadores, bodegas y minoristas a nivel global, que enfrentarían costos de transacción impensables con los métodos tradicionales. De hecho, se argumenta que hoy en día la competencia entre grandes organizaciones se da, sobre todo, en el plano de las cadenas de suministro (Büyükköçkan y Göcer, 2018)<sup>81</sup>.

Bajo este enfoque, se puede decir que las cadenas digitales de suministro amplían la cobertura geográfica del mercado de las grandes organizaciones, en el sentido de que pueden

de productos y localizaciones geográficas. Se estima que con el comercio electrónico se reportaron 85 millones de envíos en un solo día (WEF, 2016b)<sup>81</sup>.

### ¿Cómo se estiman los beneficios económicos por mayor eficiencia en la gestión de productos?

Los beneficios asociados con la digitalización y automatización en el manejo de las bodegas y los procesos de carga y descarga se pueden aproximar con el ahorro en el pago de nómina por reducción de la planta de personal directamente vinculado a esas tareas.

La automatización de estos procesos genera beneficios adicionales ya descritos en otros apartados, como la reducción en tiempos de carga y descarga (menores costos de transporte), mayor cumplimiento de las fechas de entrega (reducción de incertidumbre) y la menor necesidad de inventarios.

penetrar mercados que, con tecnologías tradicionales, estaban fuera de su alcance.

### ¿Cómo se miden los beneficios económicos de la ampliación del mercado para grandes organizaciones?

La adopción de las tecnologías 4.0 en logística se implementan precisamente porque elevan la eficiencia de las organizaciones en la forma en que se abastecen y distribuyen sus productos. En otras palabras, se trata de transformaciones orientadas por la búsqueda de eficiencia. Mayor eficiencia supone mayor valor agregado, una magnitud que se puede interpretar directamente como beneficio económico. La ampliación de la demanda, por su parte, permite diluir los costos fijos elevando aún más la generación de valor.

Desde esta perspectiva, para evaluar un proyecto de integración logística en grandes organizaciones es necesario contar con una estimación de los márgenes generados en la línea de base y en la situación con proyecto.

<sup>81</sup> La digitalización está pasando de ser un motor de la ganancia en eficiencia en el margen a un habilitador de innovación y disrupción. El comercio electrónico permite que la gente compare ofertas a nivel global (con un movimiento de ratón). En este documento, se proyectaba que el comercio entre empresas y consumidores (B2C, por sus siglas en inglés) pasaría del 29 % en 2013 al 36 % en 2018.

<sup>82</sup> Por ejemplo, en la fabricación del iPad, los semiconductores proceden de tres países diferentes; el ensamblaje se realiza en otro, las pantallas vienen de uno diferente y el diseño se hace en Estados Unidos.



## Acceso a mercados globales para firmas medianas y pequeñas

### ¿Por qué la digitalización amplía el mercado a firmas medianas y pequeñas?

Las plataformas globales de envíos o transacciones se apoyan en las tecnologías 4.0 (IdC, *big data*, IA, *blockchain*) para optimizar los procesos en las cadenas de suministro: producción, distribución y ventas. De esta forma, la parte inicial (*upstream*) y final (*downstream*) de la cadena se conectan en tiempo real, se reducen costos de distribución y se logran eficiencias. Estas plataformas permiten ampliar el mercado objetivo de las empresas medianas y pequeñas y reducir el tamaño de sus estructuras en las áreas de logística y mercadeo. En particular estas plataformas:

- Conectan vendedores individuales con millones de compradores potenciales.
- Despliegan todos los servicios logísticos.
- Ofrecen funciones para gestionar la documentación aduanera.
- Pagan impuestos y derechos aduaneros.
- Rastrear la localización del producto desde su envío hasta su recepción.

- Consolidan la demanda para conformar lotes del tamaño necesario para agotar economías de escala en transporte.
- Optimizan las rutas, los modos de transporte y la utilización de bodegas.
- Ofrecen plataformas de pago y soportes de facturación.

### ¿Cómo se valoran los beneficios por el acceso a un mercado más grande de firmas medianas y pequeñas?

Para aproximarse a un indicador de los beneficios de las plataformas digitales de comercio sería necesario contar con un indicador de la magnitud de recursos que destinan, en la situación sin proyecto, las empresas pequeñas y medianas para gestionar las áreas de mercadeo, distribución, facturación y tesorería. Se requiere, además, una estimación, en términos porcentuales, de la penetración del comercio electrónico en este segmento del mercado y de los ahorros generados por los vínculos con las plataformas de comercio electrónico.

Se han formulado modelos microeconómicos, donde las decisiones de inversión en tecnología de las cadenas de suministro inteligentes dependen del inverso de los costos de inversión en tecnologías digitales. A medida que el costo de las tecnologías se reduce, se hace más rentable, tanto en términos privados como sociales, invertir en la digitalización de las cadenas de suministro (Li, 2020).

## Descongestión vehicular en áreas urbanas

### ¿Cómo incide la digitalización de la logística en la congestión vehicular?

La introducción de drones<sup>83</sup>, robots e impresoras 3D está revolucionando la forma de distribuir los paquetes en el “último kilómetro”. Con estas tecnologías se evitan una serie de viajes asociados con la distribución de mercancías en áreas urbanas<sup>84</sup>, que, en algunas ciudades, contribuyen en forma significativa a la congestión vehicular, entre otras razones, por los tiempos detenidos para la carga y descarga de mercancías.

La digitalización de la logística también introduce mejoras en los sistemas urbanos de abastecimiento con bodegas descentralizadas en los accesos a las ciudades que permiten consolidar y separar la carga. Con ello se evita el ingreso de los camiones de carga pesada a las mallas urbanas y el aumento de la congestión. El uso de estas instalaciones se puede optimizar con la infraestructura y equipos para soportar las cadenas digitales de suministro<sup>85</sup>.

83 De acuerdo con el Foro Económico Mundial, el costo de los drones se ha reducido sustancialmente. Con lo que se compraba un dron en 2007, hoy se compran 150.

84 Distribución asociada con el consumidor (productos al detalle, reparto de comida, paquetes, etc.) y con el productor (material de construcción, recolección y disposición de residuos, transporte de insumos).

85 Se prevé, por ejemplo, que, en el futuro, convoyes de camiones autónomos atiendan los corredores de mayor movimiento de carga, con un impacto positivo en los costos de operación, la contaminación y la siniestralidad.

## ¿Cómo se miden los beneficios de una menor congestión en áreas urbanas?

En una sección anterior se explicó cómo se cuantifican los beneficios económicos asociados con la reducción de la congestión (ver el apartado “Reducción de los tiempos de viaje” en el Capítulo 4). Para el caso del transporte de carga en áreas urbanas, se aplican los mismos conceptos económicos, pero es necesario contar con una estimación de la reducción en el flujo vehicular atribuible a la distribución urbana de la carga y su impacto en la velocidad, considerando, además de la relación capacidad-flujo parametrizada para cada ciudad, la incidencia en la velocidad atribuible a los procesos de carga y descarga.

## Transparencia en la ejecución de contratos

### ¿Cómo incide la digitalización de los procesos logísticos en la ejecución de los contratos?

La digitalización facilita la celebración de contratos porque permite monitorear los flujos y asignar responsabilidades en las cadenas logísticas. En estas cadenas el estatus y desempeño en cada eslabón dependen del comportamiento en los eslabones anteriores. En ausencia de transparencia, es difícil distribuir las responsabilidades entre diferentes actores porque la información no permite establecer claramente el nodo o arco donde se interrumpió la cadena. Con tecnologías como el *blockchain* es posible pactar contratos donde la responsabilidad se asigne directamente a cada eslabón en función de su capacidad de gestionar los riesgos. Bajo este entramado contractual, cada compañía involucrada en la cadena de suministro actúa de forma transparente porque las consecuencias de sus acciones son visibles y los eventuales costos que llegasen a ocasionar los incumplimientos deben ser asumidos por el responsable.

Por otra parte, con estas tecnologías es posible programar una secuencia de reacciones ante cada escenario potencial (qué hacer si...). Esto evita interrupciones y permite que el sistema se adapte a condiciones cambiantes. La digitalización, por su parte, permite generar, procesar y almacenar toda la información relativa a las transacciones físicas y financieras que se desarrollan a lo largo de la cadena de suministro, lo que reduce los costos de administración y ejecución de los contratos.

Lo anterior supone una estimación del flujo vehicular asociado con la distribución urbana de productos<sup>86</sup> y una proyección de la penetración de las tecnologías 4.0 aplicadas a la distribución de envíos. Con estos parámetros es posible modelar la velocidad en las situaciones con y sin proyecto y estimar los tiempos de viaje asociados. El tiempo ahorrado, valorado a su costo de oportunidad, arroja una estimación del beneficio económico de estas tecnologías.

Cuando se trata del despliegue de estas nuevas tecnologías en proyectos de menor escala, cuyo impacto en los niveles de congestión es despreciable, los beneficios se deben estimar a partir de la reducción en costos de operación de los vehículos y la nómina del personal directamente involucrado en la distribución de mercancías por parte de la empresa.

### ¿Cómo se valoran los beneficios por la mayor transparencia en la ejecución de contratos logísticos en un entorno digital?

El beneficio por reducir los costos de transacción en la ejecución de contratos es específico a cada cadena en particular y su medición en términos económicos es un reto. Una primera aproximación es revisar, a partir de la ejecución de contratos bajo los arreglos logísticos tradicionales, los costos que se han ocasionado en la resolución de conflictos en términos de tribunales de arbitraje, pago en pólizas de cumplimiento y pago de sanciones por incumplimiento de los términos contractuales. Posteriormente, el formulador del proyecto debería determinar cuáles de estos costos se van a reducir y en qué proporción gracias a la celebración de contratos estructurados con base en los flujos de información que genera la digitalización de la cadena de suministro.

De igual forma, en proyectos focalizados en una empresa o grupo de empresas específicas, es posible estimar la cantidad de horas por persona destinadas a llevar a cabo labores administrativas relacionadas con la supervisión del cumplimiento de los contratos, la liquidación, la facturación y los pagos. La digitalización de las cadenas logísticas reduce los requerimientos de personal en estos procesos. El ahorro en costos administrativos por este concepto es un beneficio de la digitalización.

86. De acuerdo con el estudio del WEF (2016b), la carga urbana puede explicar entre un 20 % y un 30 % de los veh./km en el área urbana.

# Tipologías de proyectos

En principio se plantea estructurar un modelo que se adecuará a las clases de proyectos que CAF tenga en su cartera, escogidos a partir de los tipos de proyectos que incorporan componentes de digitalización listados a continuación.

- Digitalización de corredores logísticos. Estos proyectos consisten en incorporar diferentes dispositivos electrónicos para aumentar la eficiencia del transporte de mercancías y personas y de los puntos de intercambio intermodal; disminuir la congestión en las carreteras; mejorar la seguridad vial, así como monitorear y dar seguimiento a los vehículos y los productos.
- Digitalización de aduanas. Son proyectos orientados a simplificar los procedimientos aduaneros para la legalización de las mercancías, mediante el desarrollo de herramientas y aplicaciones que operan, por ejemplo, en internet, y la implementación de dispositivos que facilitan su seguimiento de un extremo a otro de la cadena de suministro.
- Plataformas digitales que facilitan la compartición de recursos entre los diferentes actores que participan en los distintos eslabones de la cadena de valor del sector logístico. A partir del análisis de los datos recopilados por diferentes dispositivos electrónicos y aplicaciones en la nube, mejoran la eficiencia de los centros de almacenamiento y la gestión de los inventarios y del transporte de cargas.
- Control y trazabilidad de las cargas y mercancías. A través de IdC, los sensores de RFID o el uso extensivo de sistemas de posicionamiento geográfico, entre otras tecnologías, son proyectos que facilitan la trazabilidad de los productos y mercancías desde su punto de producción y a su paso por las diferentes capas de infraestructura, hasta llegar a los clientes finales.
- Puertos inteligentes, cuya finalidad es aumentar la eficiencia de los procesos que se realizan en los puertos (por ejemplo, la recepción, el almacenamiento y el transporte y distribución de cargas y mercancías) y mejorar la gestión del tráfico de los diferentes modos de transporte. Para ello, desarrollan aplicaciones e implementan dispositivos que generan información útil para que haya una mayor interacción entre los actores que participan en las actividades de transporte.
- Plataformas para el comercio y las transacciones digitales basados en el desarrollo de aplicaciones que promocionan y promueven el comercio de bienes entre países y facilitan el intercambio de información para entender y responder más rápidamente a las demandas y los requerimientos de los consumidores.
- Optimización en la entrega de mercancías. Son proyectos que buscan mejorar la eficiencia de la entrega a los consumidores finales mediante la incorporación, por ejemplo, de aplicaciones, drones o el uso de impresoras 3D.

## Incentivos y barreras para la digitalización del sector de la logística

Desde una perspectiva técnica, también la digitalización de la logística exige el establecimiento de protocolos estándares 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) a las exigencias de la digitalización.

La generalización de corredores logísticos requiere además 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 las cadenas digitales de suministro es la informalidad de la actividad productiva en algunos sectores de los países de la región<sup>87</sup>. La digitalización

<sup>87</sup> La informalidad se detecta en varios eslabones de la cadena: productores, transportadores, centros de acopio, minoristas.

presume formalidad: cuentas bancarias, registro ante la Cámara de Comercio correspondiente, pago de impuestos. 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.

Es importante que el sector público lidere la digitalización de todos los procesos documentales a su cargo presentes en las operaciones de comercio interior y exterior. Se debe diseñar una estrategia dirigida a fomentar la cultura de colaboración y compartición de la información en un ambiente de confianza entre actores públicos y privados que incluya:

- Un proceso gradual para consolidar la credibilidad entre las partes.
- Un diseño de incentivos para motivar la participación de los agentes.
- Acuerdos claros de distribución de los beneficios y costos de la digitalización entre los participantes.
- La promoción de contratos estándar para la contratación de servicios logísticos en plataformas digitales y multimodales, ya que puede impulsar la eficiencia en este sector.

## Indicadores para la digitalización en el sector de logística

Los indicadores para medir la evolución de la digitalización de las infraestructuras en el sector de logística en los países de la región se presentan en el Cuadro 5.5.

Cuadro 5.5 — Indicadores para el seguimiento de la digitalización de la infraestructura del sector logístico

Indicador	Forma de cálculo
Digitalización de corredores logísticos	¿Se han conformado corredores digitales para gestionar las operaciones logísticas? Si/No Carga movilizada en los corredores digitales respecto a la carga total (porcentaje)
Puertos inteligentes	¿Ha implementado el país procesos de digitalización de puertos inteligentes? Si/No Carga movilizada en puertos inteligentes respecto a la carga portuaria total (porcentaje)
Digitalización de trámites de comercio internacional	¿Ha habilitado el país ventanillas únicas para tramitar en forma digital la documentación de comercio exterior? Si/No
Penetración de cadenas digitales de suministro	Porcentaje de carga (en valor) involucrada en procesos logísticos digitales
Penetración del comercio electrónico	Ventas realizadas por medio de plataformas electrónicas (porcentaje)
Penetración de robots	Número de robots operando en actividades manufactureras
Participación de esquemas de transporte y almacenamiento compartido	Operadores logísticos que cuentan con contratos para compartir infraestructura de transporte y bodegas (ponderado por el volumen o valor de la carga)

# Aspectos generales de la guía metodológica para la formulación y evaluación paso a paso de los proyectos de digitalización

## Estructura de la guía para formular y evaluar proyectos de digitalización

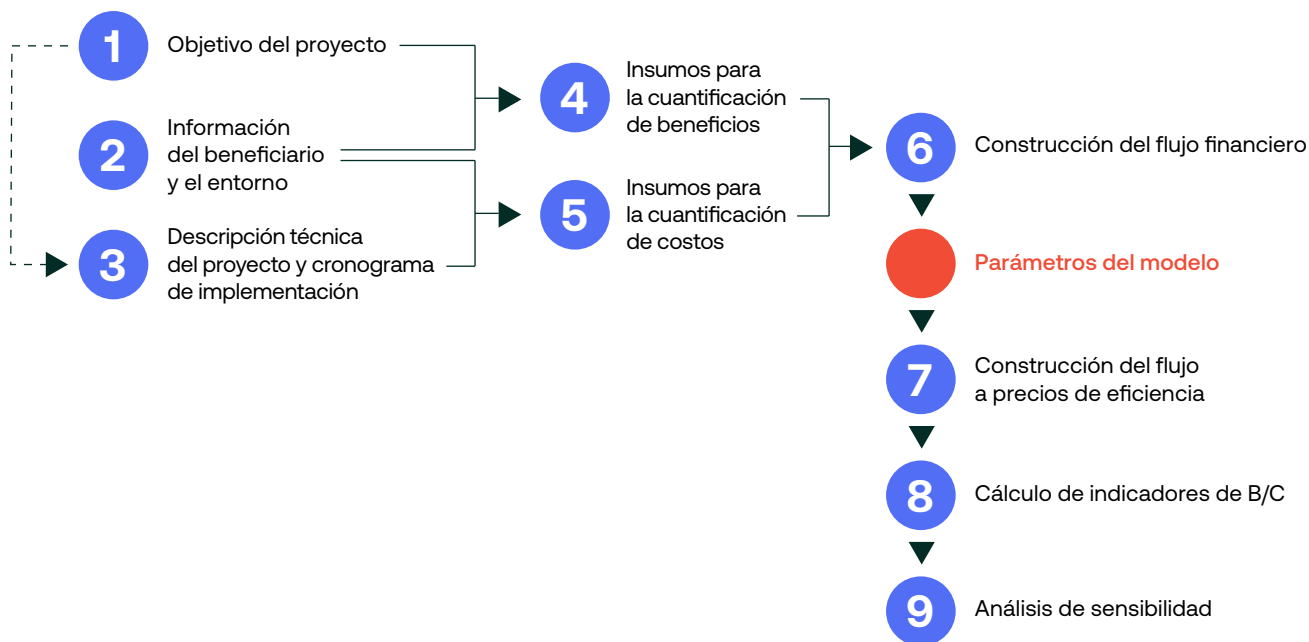
Como parte del estudio, se desarrolló una guía que plantea los pasos a seguir para llevar a cabo una evaluación beneficio-costos en los proyectos de digitalización de infraestructura para los sectores de la electricidad, la movilidad y la logística. En la primera parte (pasos 1, 2 y 3), se reúne la información 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.

Además, se definieron una serie de parámetros utilizados para la evaluación socioeconómica, adaptados para los distintos países de Latinoamérica que disponen de esta información. Posteriormente, la guía explica la forma de construir el 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.

## Objetivo del proyecto

El primer paso es establecer los objetivos del proyecto. El formulador se debe preguntar cuáles son las necesidades específicas que busca resolver con el proyecto de digitalización. El Cuadro 6.1 recoge una lista no exhaustiva de los objetivos de digitalización en estos sectores.

Figura 6.1 — Estructura de la guía para formular y evaluar proyectos de digitalización paso a paso



Cuadro 6.1 — Objetivos de los proyectos de digitalización en infraestructura

<b>Eléctrico</b>	<b>Movilidad</b>	<b>Logística</b>
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 los insumos y productos
Reducir los índices de interrupciones en el suministro	Reducir la accidentalidad	Reducir los índices de deterioro de las mercancías
Estimular la reacción de la demanda ante la señal de precios	Optimizar la operación del transporte público	Reducir la variabilidad en los tiempos de entrega
Facultar técnica y comercialmente la introducción de recursos de generación embebidos en la red de distribución (DER)	Reducir los costos del recaudo en el transporte público	Ampliar el alcance geográfico del mercado
Aplazar las inversiones en generación	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 el “último kilómetro”
		Reducir la congestión en 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 desenvuelve<sup>88</sup>. El contexto macro permitirá soportar las proyecciones de demanda que alimentan la

evaluación del proyecto. El entorno institucional ayudará a 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 ser 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 en

el 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 la estimación de los costos de incorporación de los componentes de digitalización del proyecto (gastos de inversión y 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 e inteligencia),

el documento ofrece una serie de cuadros para guiar la implementación de los componentes de digitalización:

- Equipos o aplicaciones.
- Funcionalidades de los equipos o aplicaciones.
- Determinantes de los costos (CAPEX y OPEX).

## 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 6.2 se presenta la valoración económica propuesta para algunos de los beneficios contemplados en los proyectos de digitalización para cada sector.

<sup>88</sup> Esta sección está basada en la guía de evaluación de proyectos de la Unión Europea (Comisión Europea, 2014).

Cuadro 6.2 — Valoración económica de los beneficios de los proyectos de digitalización

Eléctrico	Movilidad	Logística
Reducción de los gastos del área comercial: costo de oportunidad de la mano de obra	Reducción en los tiempos de viaje: valor económico del tiempo	Ahorro en costos de transporte: modelación de costos de transporte con proyecto y sin él
Aumento de la eficiencia del recaudo: costo marginal de los fondos públicos	Reducción en los costos de operación de los vehículos (VOC): modelación de costos (HDM)	Ahorro en costos de almacenamiento: reducción de los costos financieros y en pago de arriendo, tarifas o infraestructura propia
Reducción de las 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 <sub>2</sub> equivalente	Menor incertidumbre en los tiempos de entrega: reducción de sanciones por incumplimiento y disponibilidad a pagar por mayor cumplimiento
Reducción de las 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 los mercados globales: menor gasto de operación en las áreas comerciales, de distribución, facturación y tesorería. Mayor valor agregado por ampliación de las ventas
Promoción de la entrada de recursos de generación descentralizada (DER): aplazamiento de inversiones y reducción en costo marginal	Optimización del transporte público: ahorros en gastos de inversión y operación	Descongestión vehicular en áreas urbanas: menores externalidades ambientales y de congestión
Suavización del perfil horario de consumo: aplazamiento de inversiones y reducción en costo marginal como respuesta a un esquema de tarifas dinámicas	Reducción de los costos de recaudo: reducción 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 el 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 del inversionista y el valor presente neto con una tasa de descuento acorde con el nivel de riesgo percibido por este. 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.

## Construcción del flujo económico

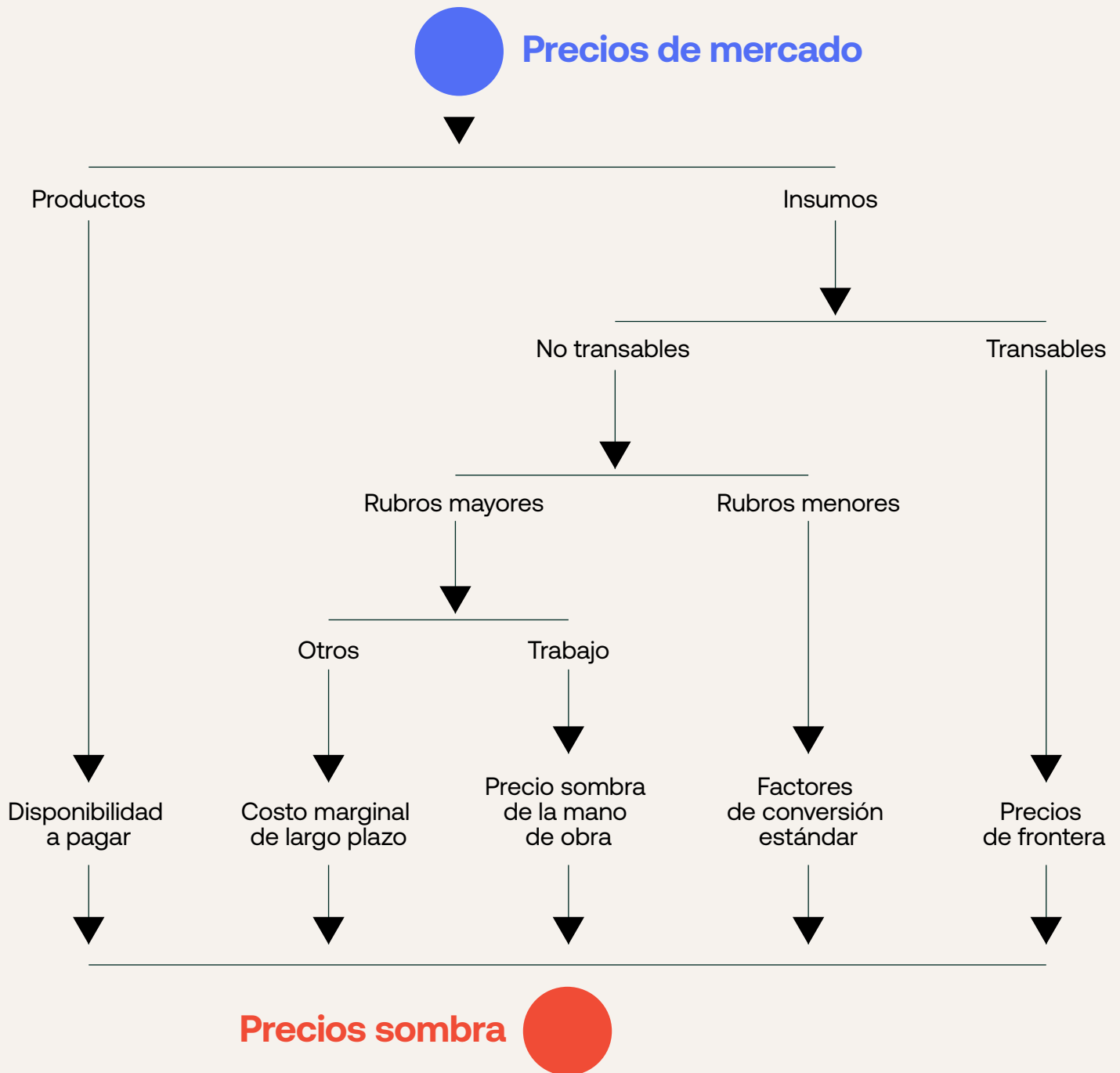
La metodología general de evaluación de proyectos supone mercados en competencia donde el precio de los productos iguala el costo marginal y los factores son remunerados por sus respectivas productividades marginales. En la práctica, no obstante, las economías están expuestas a rigideces, distorsiones, externalidades y fallas de mercado<sup>89</sup>. 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.

89 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 o con los que no se realizan transacciones, como las externalidades ambientales.



Figura 6.2 — Paso de precios de mercado a precios de eficiencia



Fuente: Adaptado de Comisión Europea (2014)

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 6.2 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 parámetros específicos a los beneficios de 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-costos

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 el 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.

Cuando 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.

## 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 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.

# Estructura detallada de la guía paso a paso para formular y evaluar proyectos de digitalización en los sectores de la energía, la movilidad y la logística

En este capítulo se ha presentado de manera muy resumida la estructura metodológica que permite la evaluación de los proyectos de digitalización. Se puede encontrar una descripción detallada de la estructura de la guía metodológica para cada uno de los tres sectores en los siguientes documentos complementarios<sup>90</sup>:

- Anexo 1: Guía práctica para incorporar la digitalización en los proyectos de infraestructura en el sector de la electricidad.
- Anexo 2: Guía práctica para incorporar la digitalización en los proyectos de infraestructura en el sector de la movilidad.
- Anexo 3: Guía práctica para incorporar la digitalización en los proyectos de infraestructura en el sector de la logística.

<sup>90</sup> Disponibles en la Scioteca de CAF.

# Conclusiones y recomendaciones para la adopción de políticas e instrumentos para impulsar la digitalización funcional de las infraestructuras en América Latina

## Conclusiones

Una de las principales consecuencias de la evolución tecnológica de las industrias de la electrónica, la informática y las telecomunicaciones ha sido un costo decreciente en el transporte, almacenamiento y procesamiento de grandes volúmenes de datos. Esa evolución también ha proporcionado capacidades de procesamiento y almacenamiento cada vez mayores, así como tecnologías de acceso y transmisión con velocidades siempre en aumento.

Estos cambios han permitido que surja una economía digital. Este concepto hace referencia a una amplia gama de actividades económicas que utilizan información y conocimiento digitalizados como factores clave de producción, crean beneficios y eficiencias y transforman las interacciones sociales y la forma como las personas interactúan, trabajan y se divierten, generando grandes cambios sociológicos.

Los cambios tecnológicos en estas tres industrias nos están llevando a los albores de una Cuarta Revolución Industrial. Esta se caracteriza por un internet más ubicuo y móvil, por sensores más pequeños y baratos, y por la inteligencia artificial y el aprendizaje automático (*machine learning*).

El sustrato de esta nueva revolución industrial está en tecnologías preexistentes, algunas de las cuales corresponden a innovaciones incrementales, pero también invenciones e innovaciones disruptivas con un alto potencial transformacional, que además operan y se complementan entre sí. Entre ellas están la inteligencia artificial, el internet de las cosas, las redes 5G, la computación en la nube, los datos masivos, la cadena de bloques y la creciente potencia de cómputo.

En ese contexto surge la digitalización, que es el uso de tecnologías y datos digitales, así como la interconexión, lo que da como resultado actividades nuevas o cambios en las actividades existentes, y la transformación digital. Esta se refiere a los efectos económicos y sociales de la digitalización.

La materia prima de la digitalización son los datos asociados a las personas, las empresas, los gobiernos y las transacciones que estos realizan, pero también los vinculados al comportamiento del mundo físico (mediciones, imágenes, localización de personas) o los resultantes de la interacción entre máquinas (M2M). Esos datos se transportan mediante una diversidad de redes alámbricas o inalámbricas (FTTx,

4G, 5G, LoRa, etc.) y luego son depurados, almacenados, verificados, gestionados y analizados mediante diversas tecnologías (IA, computación en la nube, *big data* y *blockchain*), transformándose en conocimientos aplicados, ideas e inteligencia, que habilitan nuevos productos, aplicaciones y servicios. De esta forma, crean un valor significativo en cada sector de la economía que se digitaliza, mejorando sus capacidades de planificación, gestión e innovación y beneficiando a los ciudadanos.

La digitalización es el habilitador clave de las industrias de esta Cuarta Revolución Industrial. Nutre innovaciones como el comercio electrónico, los servicios financieros electrónicos, la economía colaborativa, la automatización y la robotización avanzada, la impresión 3D, los drones y otros tipos de vehículos autónomos, las redes inteligentes y las cadenas de suministro globales.

Los procesos de digitalización de infraestructuras tienen una doble connotación: algunos hacen referencia al cierre de

brechas en tecnologías tradicionales de la Tercera Revolución Industrial (típicamente de conectividad e interoperabilidad), pero que resultan esenciales para la consolidación de la digitalización; otros, al surgimiento de nuevas tecnologías, aplicaciones y servicios característicos de la Cuarta Revolución Industrial.

En ese contexto, 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 y prestación de servicios.
- 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.

## Experiencias internacionales en el sector de la energía eléctrica

Del análisis de experiencias internacionales de digitalización de infraestructura en este sector se destaca lo siguiente:

- El despliegue de recursos de energía distribuida en Estados Unidos (California). Dicho despliegue correspondió a una política de Estado que permitió la interconexión, operación, medición y pago por energía neta consumida de aproximadamente 800.000 usuarios, con una capacidad instalada de 6.500 MW. La iniciativa se apoyó desde el punto de vista tecnológico en el uso de medidores e inversores inteligentes del lado de los usuarios, así como en sistemas de comunicación y control que facilitan su agregación para poder ofrecer capacidad y energía al mercado y competir con los generadores tradicionales.
- El programa SMIP en el Reino Unido. Concebido para instalar 27 millones de medidores inteligentes de electricidad por parte de los comercializadores de energía a un costo de GBP 11.000 millones, el programa optó por una arquitectura centralizada. En virtud de esta, se otorgó a la Data Communications Company (DCC) la gestión y el control de las comunicaciones y el flujo de información del sistema que facilita el cambio de comercializador de energía, promoviendo la competencia. Además, estableció un esquema de gobernanza de datos centralizado basado en una política de acceso a los datos y de privacidad.
- La utilización por parte de una *start-up* británica de algoritmos de IA para predecir y optimizar el consumo energético de un edificio. Para ello, combinó los datos generados por dicho sistema de gestión de energía con datos del clima y del flujo de personas y la información obtenida del medidor inteligente y del mercado energético.
- El desarrollo del proyecto “Colombia Inteligente”. Fue creado para coordinar la búsqueda de soluciones tecnológicas aplicables a toda la cadena de valor para la prestación de los servicios de energía eléctrica, que comprende desde la generación hasta el consumo final. El proyecto buscaba viabilizar la implementación de redes inteligentes con acciones y derroteros que recurren a cuatro tecnologías: i) infraestructura de medida avanzada; ii) automatización de la red de distribución; iii) recursos energéticos distribuidos; y iv) movilidad eléctrica.
- La implementación en Chile de sistemas de medición, monitoreo y control (SMMC) estableció como obligación de las empresas distribuidoras que midieran el consumo, monitorearan el estado de suministro y controlaran la operación remota, definiendo metas a dos y siete años. Sin embargo, tardó dos años en especificar el estándar, lo que desató la llamada “crisis de los contadores inteligentes”, periodo durante el cual las empresas del sector eléctrico instalaron medidores inteligentes bajo estándares diferentes a los definidos, problema que el Gobierno chileno aún no ha terminado de resolver.

- El proyecto para mejorar la eficiencia energética en Uruguay, se sustentó en dos ejes: i) la promoción de programas de generación a través de energías alternativas eólicas y fotovoltaicas, que representan el 36 % de la capacidad instalada, y ii) un programa para instalar 1,5 millones de medidores inteligentes, que se está implementando mediante la cooperación entre las empresas estatales de energía (UTE) y telecomunicaciones (ANTEL), y que permitirá a los usuarios acceder a tarifas variables por horas. El proyecto incorpora innovaciones, como una plataforma de *blockchain*, con el fin de dar soporte a la certificación de origen de la energía renovable.

La digitalización tiene el potencial de generar cambios en la cadena de valor de energía en aspectos relacionados con la gestión del ciclo de vida de los activos (funcionamiento del sistema eléctrico, reduciendo los tiempos de respuesta frente a la ocurrencia y detección de fallas, análisis sobre la estabilidad

## Experiencias internacionales en el sector de la movilidad

Del análisis de experiencias internacionales de digitalización de infraestructura en este sector se destaca lo siguiente:

- El gran avance de los sistemas de movilidad en Singapur, uno de cuyos pilares es la inteligencia. Este involucra sistemas de control (semáforos inteligentes y señalización dinámica), monitoreo y vigilancia (mediante diversos tipos de cámaras), gestión de la información (de las condiciones del tráfico y el transporte público en tiempo real) y recaudo (de tarifas de transporte público, parqueaderos y peajes). Todo ello ha contribuido a mejorar la experiencia de los usuarios del transporte público y su nivel de adopción, así como la sostenibilidad y seguridad de este.
- Las innovaciones de movilidad como servicio (MaaS) en Finlandia. Esta plataforma integra servicios de transporte de proveedores públicos y privados, en medios individuales y colectivos, a través de una única aplicación web o móvil. La aplicación permite diseñar un viaje según las necesidades y preferencias específicas del usuario, mediante diferentes modos de transporte (metro, tren, buses, taxis, bicicletas, vehículos rentados, Uber, etc.) y pagarlo con una única cuenta.
- La implementación del sistema de cargo por congestión en Estocolmo (Suecia). Este consiste en cobrar un peaje al ingresar o salir del centro de la ciudad para desincentivar el uso del vehículo en dicha zona, reducir así los niveles de congestión, aumentar la accesibilidad y mejorar las condiciones ambientales. Los cobros se realizan mediante tecnologías de comunicaciones de corto alcance entre

del sistema, la ocurrencia de transientes y la detección de pérdidas no técnicas). Otros ámbitos susceptibles a esos cambios son la optimización e integración de la red (planeación y diseño de las redes eléctricas, introducción de los DER, reducción de la huella de carbono) y los servicios integrados a los usuarios (tarificación horaria, tarifas dinámicas para la compra y venta de energía generada por los DER, identificación de hábitos de consumo de los usuarios, la elaboración de perfiles de carga e identificación de los DER).

La incorporación de técnicas avanzadas de análisis y procesamiento de los datos recopilados por las redes inteligentes permitirán el desarrollo de nuevos modelos de negocio en el sector de la energía. Entre ellos están los servicios de vehículos a la red (V2G) y de la red a los vehículos (G2V), servicios de respuesta a la demanda (DR) o servicios para la integración de energías renovables.

los vehículos y la infraestructura (V2I) y cámaras con reconocimiento automático del número de matrícula.

- La adopción de medidas de prevención y control del fraude en el metro de São Paulo (Brasil). Mediante la instalación de 5.200 cámaras digitales de alta definición, se prevé escanear los rostros de 4 millones de pasajeros por día para monitorear a las personas, las instalaciones del metro y el centro de control de operaciones, entre otros. El sistema incluye funciones de inteligencia, como el reconocimiento facial, la identificación y seguimiento de objetos y la detección de invasión de áreas.
- La unificación en Santiago de Chile de los medios de pago del sistema de transporte integrado multimodal, compuesto por el servicio de buses, metro y tren suburbano, mediante un sistema electrónico de pago de pasajes (SEPP) y el sistema de recaudo asociado.
- El desarrollo de estudios de movilidad urbana y planificación del transporte en Neuquén (Argentina). Utilizando herramientas de *big data* para analizar información proveniente de los teléfonos móviles de los usuarios, se determinan los patrones de movilidad de los pasajeros y generan matrices de viajes origen-destino, tanto totales como por franjas horarias, para mejorar la planificación del transporte público en la ciudad.

La digitalización del transporte público requiere de un conjunto de elementos tecnológicos. Esto son los que soportan el control

y monitoreo de la flota, el recaudo de los ingresos a través de diferentes medios de pago, los sistemas de información y servicio al usuario, y las herramientas de analítica. Estas herramientas permiten, por ejemplo, utilizar los registros de teléfonos móviles o tarjetas inteligentes utilizadas en el pago del transporte público para analizar los comportamientos de

desplazamiento y elaborar modelos de demanda que apoyen el diseño de las rutas y mejoren la eficiencia del transporte público. Además, puede instalarse infraestructura urbana inteligente que soporte aplicaciones de pago de peajes urbanos o cargos de congestión o contaminación mediante aplicaciones que comunican los vehículos a la infraestructura (V2I).

## Experiencias internacionales en el sector logístico

Del análisis de experiencias internacionales de digitalización de infraestructura en el sector logístico se destaca:

- La transformación del puerto de Hamburgo (Alemania) en un puerto inteligente que integra diferentes centros de control del tráfico (terrestre, marítimo y ferroviario) con base en datos en tiempo real. Este avance permite la toma de decisiones y la interacción continua con actores que participan activamente en actividades de transporte, integrando el tráfico y la gestión de la infraestructura mediante una variedad de sensores y actuadores (IdC). Estos se encuentran ubicados en las instalaciones portuarias para la coordinación de los flujos de tráfico fluvial y vial y para medir las condiciones de la infraestructura y los impactos ambientales.
- La aplicación del IdC y el *big data* para optimizar la entrega de mercancía de DHL en India, que permite el análisis utilizando algoritmos de *big data*. Para desarrollarlos se emplean datos generados por los sensores de los camiones, sumados a datos del clima, el tráfico, la disponibilidad de clientes para la recogida o entrega de mercancía, el nivel de prioridad del envío, las características técnicas y el historial de mantenimiento o de accidentes de los camiones, entre otros. De esta forma se pueden generar, entre otras cosas: i) rutas óptimas y dinámicas de entrega y recogida de mercancía; y ii) predicciones de las necesidades de mantenimiento de los camiones.
- La digitalización de las aduanas de Corea del Sur para la creación de un sistema de ventanilla única basado en internet. Mediante este sistema se ha logrado vincular electrónicamente a todas las partes interesadas, incluidas

169 agencias gubernamentales coreanas y 260.000 compañías, tales como empresas logísticas, comerciales, navieras, aerolíneas y bancos.

- La digitalización de la gestión y operación del canal de Panamá y la aplicación del internet de las cosas. El reto de este proyecto consiste en mantener tecnologías legadas, con una variedad de sistemas y equipos, e integrarlos con las tecnologías más avanzadas para la recolección de datos con los que se monitorea y controla cada aspecto de la operación del canal. El foco se ha puesto en particular en la gestión y operación del canal mediante centros de control del tráfico marítimo, la gestión del recurso hídrico y los sistemas de seguridad, apoyados en el uso extensivo del IdC.
- El caso de los corredores logísticos TEN-T en Europa, una iniciativa de la Unión Europea para la construcción de una red de transporte intermodal (modos terrestres, aéreos y acuáticos) de mercancías y personas. Este proyecto considera un marco para la implantación de sistemas de transporte inteligentes (STI) que garanticen su compatibilidad e interoperabilidad.

La digitalización en el sector logístico tiene el potencial de transformar diversos aspectos: los servicios de información (torres de control logístico), los nuevos servicios logísticos (plataformas transfronterizas, contratos de *blockchain*), las capacidades de entrega de mercancía ampliadas (drones, vehículos terrestres autónomos, impresión 3D, ") y las capacidades de compartición (plataformas digitales para compartir recursos de la cadena logística, como el transporte y el almacenamiento).

## Beneficios socioeconómicos de la digitalización de las infraestructuras

En este reporte, se analizaron en términos cuantitativos y cualitativos los beneficios económicos y sociales asociados a la digitalización funcional de las infraestructuras y los activos en los sectores de la energía eléctrica, la logística y la movilidad.

Además, se aportó el sustento técnico y el diseño de una propuesta metodológica que podrá ser aplicada de forma práctica a los proyectos de CAF. Para esto, se analizaron desde un enfoque técnico-económico las principales tendencias

en materia de digitalización en el diseño y gestión de esas infraestructuras, así como la prestación de servicios digitales asociados a las mismas. También, se desarrolló un enfoque metodológico, en el cual se incorporaron las oportunidades derivadas de la transformación digital en los proyectos de infraestructura.

A partir de los análisis de las experiencias internacionales y los resultados obtenidos, se evidencia que la digitalización de las infraestructuras de los sectores de la energía eléctrica, la movilidad y la logística trae consigo importantes beneficios que justifican la incorporación de componentes digitales en los proyectos que se realicen en estos sectores.

## Recomendaciones

De los análisis realizados en este documento se desprenden varias recomendaciones, presentadas a continuación, respecto al tipo de políticas públicas, instrumentos regulatorios y de

### Energía

- Se considera pertinente que los países establezcan, en colaboración con los grupos de interés del sector privado, **programas de largo plazo**. En ellos, se deberían identificar las metas nacionales para la digitalización de la infraestructura del sector de la energía eléctrica, incluyendo aspectos como infraestructura de medida avanzada, automatización de la red de distribución, recursos energéticos distribuidos y movilidad eléctrica.
- Los **estímulos fiscales** para financiar proyectos de eficiencia energética, infraestructura de la red eléctrica, energía limpia y tecnologías e infraestructura de transporte alternativas pueden generar incentivos para la inversión que aceleren la implementación de la digitalización.
- Es importante la **adopción de estándares** que permitan identificar las comunicaciones y flujos de electricidad entre cada uno de los dominios (generación, transmisión, distribución, DER, cliente) y las interrelaciones que se dan entre ellos, garantizando la interoperabilidad, entendida como la capacidad de dos o más dispositivos, independientemente del fabricante, para intercambiar y utilizar la información y lograr la correcta operación de los sistemas.

Medir la digitalización de los tres sectores económicos analizados en América Latina es difícil, porque no hay un estándar en las metodologías utilizadas para evaluar el estado de avance y los que existen no estudian de forma específica el estado de digitalización de los sectores analizados.

En un proceso de digitalización, se necesita contar con un conjunto de precondiciones, como el desarrollo de las TIC, la conectividad móvil y el desarrollo de la banda ancha, sin las cuales no se dispondrá de una capa esencial, la de conectividad. La evidencia muestra que los países de América Latina pueden desarrollar mayores capacidades para crear un ecosistema y herramientas que ayuden a cerrar la brecha digital existente con países desarrollados e impulsar la digitalización de sus infraestructuras.

promoción industrial que pueden contribuir al impulso de la digitalización de las infraestructuras en los tres sectores económicos estudiados.

- Es necesario contar con un **marco normativo**, que, entre otros aspectos:
  - Defina los derechos y obligaciones de los proveedores de energía, operadores de la red, comercializadores y otros interesados involucrados en la implementación de redes inteligentes y particularmente de la medición inteligente.
  - Articule la estandarización técnica con el despliegue e implementación, para que los diferentes actores e interesados que participan en las diferentes etapas de la cadena de valor del sector eléctrico tengan claridad sobre las condiciones que se deben cumplir, evitando reprocesos y costos, tanto para las empresas como para los usuarios del servicio de energía eléctrica.
  - Establezca la gestión efectiva de los recursos de energía distribuidos, así como los procesos de medición y pago.
  - Defina los esquemas de gobernanza de datos de los usuarios del sector eléctrico, así como la política de datos y privacidad asociada.



- Es preciso resolver el problema del “último kilómetro”, que permite la conexión entre los medidores inteligentes y el resto de la red (capa de conectividad) de una forma económicamente eficaz. Para ello, se presentaron dos

alternativas que están en extremos opuestos: el caso de Reino Unido, con la conformación de la DCC, y el caso de Uruguay, donde hubo cooperación entre dos empresas públicas, una de energía y otra de telecomunicaciones.

## Movilidad

- La **definición de protocolos** entre infraestructura y vehículos (V2I) que garantice la interoperabilidad de los sistemas para aplicaciones como peajes electrónicos o la implementación de cargos por congestión.
- El **uso de innovaciones sociales** en la implementación de medidas, como los cargos por congestión, que suelen implicar una reacción ciudadana adversa cuando el público visualiza los eventuales costos económicos, pero no ha vivido los beneficios que la normativa implica (menos congestión, menos contaminación, menores tiempos de viaje). En tal sentido, son de interés experiencias como la de Estocolmo, donde la medida se implementó en forma provisional y luego se sometió a votación ciudadana.
- 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 en caso de que una controversia llegue a los tribunales.
- 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.

## 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 en la digitalización del sector logístico. Por ejemplo, la implementación de sistemas de transporte inteligentes en el sector del transporte por carretera en la Unión Europea 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 mercancías, 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 o necesarias para la defensa.
- 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 podrá 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, como se ha realizado, por ejemplo, en Corea del Sur.

# Referencias

## A

Accenture (2020a). “The intelligent border agency unleashed”. *Accenture* [en línea]. The new border agency. Disponible en <https://www.accenture.com/gb-en/services/public-service/border-agency>

Accenture (2020b). “The digital marketplace for cross-border trade”. *Accenture* [en línea]. Public Service. Disponible en <https://www.accenture.com/ae-en/insights/public-service/cross-border-trade-platforms>

ADB (2018). *Understanding the digital economy: What is it and how can it transform Asia?* Banco Asiático de Desarrollo. Disponible en <https://www.adb.org/news/events/understanding-digital-economy-what-it-and-how-can-it-transform-asia>

AGCS (2014). “Panama Canal 100”. *Allianz*. Disponible en [https://www.allianz.com/content/dam/onemarketing/azcom/Allianz\\_com/migration/media/press/document/other/AGCS\\_Risk\\_Bulletin\\_Panama\\_Canal\\_100\\_FINAL\\_Web\\_Hi-res\\_final.pdf](https://www.allianz.com/content/dam/onemarketing/azcom/Allianz_com/migration/media/press/document/other/AGCS_Risk_Bulletin_Panama_Canal_100_FINAL_Web_Hi-res_final.pdf).

Aguirre, A., Giachino, M., Cazes Boezio, G. y Gutiérrez, A. (2015). “Learning with smart grids: an implementation proposal for Uruguay”. *2015 IEEE PES innovative smart grid technologies Latin America (ISGT LATAM)*, 5.

AIE (2017). *Digitalization & Energy*. París, Francia: Agencia Internacional de la Energía.

AIE (2019). *Case study: artificial intelligence for building energy management systems*. *Context*. Disponible en <https://www.iea.org/articles/case-study-artificial-intelligence-for-building-energy-management-systems>

AIE (2020a). “Exploring the impacts of the Covid-19 pandemic on global energy markets, energy resilience, and climate change”. *COVID-19*. Agencia Internacional de la Energía. Disponible en <https://www.iea.org/topics/covid-19>

AIE (2020b). “Energy efficiency is changing, with new digital technologies enabling greater control, optimisation and analytics”. *Energy efficiency and digitalisation* [en línea]. Disponible en <https://www.iea.org/articles/energy-efficiency-and-digitalisation>

Alamys (2019). “Metro de São Paulo compra sistema de monitoreo electrónico con reconocimiento facial”. Alamys [en línea]. Asociación Latinoamericana de Metros y Subterráneos. Consultado el 14 de octubre de 2020 en <https://www.alamys.org/es/noticias/metro-de-sao-paulo-compra-sistema-de-monitoreo-electronico-con-reconocimiento-facial/>

Alaqeel, T. y Suryanarayanan, S. (2019). “A comprehensive cost-benefit analysis of the penetration of smart grid technologies in the Saudi Arabian electricity infrastructure”. *Utilities Policy*. DOI: 10.1016/j.jup.2019.100933, 60(C).

Amazon (2020). *¿Qué es la inteligencia artificial? Aprendizaje automático y aprendizaje profundo*. Consultado en septiembre de 2020 en <https://aws.amazon.com/es/machine-learning/what-is-ai/>

Anderson, R. y Fuloria, S. (2011). *Smart meter security : a survey*. Cambridge, Reino Unido.

Arthur D. Little (2017). *Logistics 4.0 – Facing digitalization- driven disruption*.

Arup (2015). *Provision of market research for value of travel time savings and reliability. Non-technical summary report*. Department for Transport. Disponible en [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/470229/vtts-phase-2-report-non-technical-summary-issue-august-2015.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/470229/vtts-phase-2-report-non-technical-summary-issue-august-2015.pdf).

ASEC (2014). “The social discount rate”. *Andrew Shelley Economic Consulting* [en línea]. Disponible en [http://www.asec.co.nz/2014/02/the-social-discount-rate.html#\\_1](http://www.asec.co.nz/2014/02/the-social-discount-rate.html#_1)

Audouin, M. y Finger, M. (2018). “The development of mobility-as-a-service in the Helsinki metropolitan area: a multi-level governance analysis”. *Research in Transportation Business & Management*, 27, 24-35.

Autoridad del Canal de Panamá (2020). *Principales rutas comerciales del tráfico por el Canal de Panamá*. Consultado en junio de 2020 en <https://micanaldepanama.com/wp-content/uploads/2019/10/00-PrincipalesRutasComerciales-1.pdf>

## B

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

BBC (2020). "United Kingdom country profile". *BBC News* [en línea]. Disponible en <https://www.bbc.com/news/world-europe-18023389>

BID (2016). *Smart Grids Colombia Visión 2030*. Banco Interamericano de Desarrollo.

Bocarejo, J., Rodríguez, M., Rosales, R., Arguello, R., Rodríguez, J., Delgado, R. y Cadena, A. (2016). *Upstream analytical work to support development of policy options for mid- and long-term mitigation objectives in Colombia - Informe producto C*. Bogotá: Ministerio de Ambiente.

Broughel, J. (2017). "A task for Trump's OMB Director: regulatory reform". *RealClear Policy* [en línea]. Disponible en [https://www.realclearpolicy.com/articles/2017/01/24/a\\_task\\_for\\_trumps\\_omb\\_director\\_regulatory\\_reform\\_110145.html](https://www.realclearpolicy.com/articles/2017/01/24/a_task_for_trumps_omb_director_regulatory_reform_110145.html)

Büyüközkan, G. y Göcer, F. (2018). "Digital supply chain: literature review and proposed framework for future research". *Computers in Industry*, 97, 157-177.

## C

CAF (2016). *Perfil logístico de América Latina - Panamá*. CAF.

CAF (2020a). *Las oportunidades de la digitalización en América Latina frente al COVID-19*. Caracas, Venezuela: CAF.

CAF (2020b). *El estado de la digitalización de América Latina frente a la pandemia del COVID-19*. Caracas, Venezuela: CAF.

CAF (2021). "Metro São Paulo Línea 5". *CAF* [en línea]. Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles. Disponible en <https://www.caf.net/es/productos-servicios/proyectos/proyecto-detalle.php?p=254>

California Distributed Generation Statistics (2020a). "California distributed generation programs". *California Distributed Generation Statistics* [en línea]. Disponible en <https://www.californiadgstats.ca.gov/programs/>

California Distributed Generation Statistics (2020b). "Statistics and Charts". *California Distributed Generation Statistics* [en línea]. Disponible en <https://www.californiadgstats.ca.gov/charts/nem>

Campos, J., Serebrisky, T. y Suárez-Alemán, A. (2015). "Porque el tiempo pasa: evolución teórica y práctica en la determinación de la tasa social de descuento". *Nota técnica 861*, 1-53. Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

Cañas Rengifo, A. F. (2015). *El costo marginal en bienestar de los fondos públicos en Colombia*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/55473/1115063506.2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Carley, S. (2016). "Energy programs of the American Recovery and Reinvestment Act of 2009". *Review of Policy Research*, 201-223.

Carreño, I. (2020). "Metro de São Paulo deberá demostrar seguridad de datos recopilados por reconocimiento facial". *DPL News* [en línea]. Disponible en <https://digitalpolicylaw.com/metro-de-sao-paulo-debera-demostrar-seguridad-de-datos-recopilados-por-reconocimiento-facial/>

CEN, CENELEC y ETSI (2012). *Smart grid reference architecture*. Bruselas, Bélgica: Unión Europea. Disponible en [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/xpert\\_group1\\_reference\\_architecture.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/xpert_group1_reference_architecture.pdf).

CEN, CENELEC y ETSI (2014). "SGAM user manual. Applying, testing & refining the smart grid architecture model (SGAM) Version 3.0". *SG-CG/M490/K\_ SGAM usage and examples*. Smart Grid Coordination Group.

Chalfin, A. (2016). "Economic costs of crime". En W. G. Jennings, *The encyclopedia of crime and punishment*. John Wiley & Sons, Inc. DOI: 10.1002/9781118519639.wbecpx193.

Chang, W. y Grady, N. (2015). *NIST big data interoperability framework: volume 1, definitions. Special publication*. National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg, Estados Unidos: National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1500-1r2>

Cheng, Z., Pang, M.-S. y Pavlou, P. (2020). "Mitigating traffic congestion: the role of intelligent transportation systems". *Information Systems Research*, 31(3).

Chisari, O. y Cicowiez, M. (2010). *El costo marginal de los fondos públicos y los regímenes regulatorios: evaluación de equilibrio general computable para la Argentina*. Santiago. Disponible en [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-88702010000100004](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-88702010000100004)

Chou, J.-S. y Bui, D.-K. (2014). "Modeling heating and cooling loads by artificial intelligence for energy-efficient building design". *Energy and Buildings*, 437-446.

- CIA (2020). "The world factBook: Chile". *Central Intelligence Agency* [en línea]. Disponible en <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/ci.html>
- CIER (2020). "UTE inicia plan para habilitar tarifa variable hora por hora". *Comisión de Integración Energética Regional* [en línea]. Disponible en <https://www.cier.org/es-uy/Paginas/UTE-inicia-plan-para-habilitar-tarifa-variable-hora-por-hora.aspx>
- Cisterna Orellana, M. E. (2008). *Metodología de cálculo de costo de falla inepetstivo*. Santiago de Chile: Universidad de Chila.
- Cointelegraph (2020). "Ente rector eléctrico en Uruguay manifiesta intención de desarrollar plataforma blockchain para medidores inteligentes". *Cointelegraph en Español* [en línea]. Disponible en <https://es.cointelegraph.com/news/electricity-governing-body-in-uruguay-expresses-intention-to-develop-blockchain-platform-for-smart-meters>
- Colombia Inteligente (2016). "¿Quiénes somos? Iniciativa sectorial para el desarrollo de redes inteligentes en Colombia". *Colombia Inteligente* [en línea]. Disponible en <https://www.colombiainteligente.org/index.php/nosotros/quienes-somos>
- Colombia Inteligente (2019). *Informe de gestión 2019*. Bogotá D. C., Colombia: Colombia Inteligente.
- Comisión Europea (2014). *Guide to cost-benefit analysis of investment projects. Economic appraisal tool for cohesion policy 2014-2020*. Unión Europea. Disponible en [https://ec.europa.eu/regional\\_policy/sources/docgener/studies/pdf/cba\\_guide.pdf](https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/studies/pdf/cba_guide.pdf).
- Comisión Europea (2018). *Support study for the ex-post evaluation of the ITS Directive 2010/40/EU*. Bruselas, Bélgica: Unión Europea.
- Comisión Europea (2020). *How the Covid-19 pandemic is changing urban mobility*. Disponible en <https://cordis.europa.eu/article/id/422228-how-the-covid-19-pandemic-is-changing-urban-mobility>
- Comité Asesor del Ministro de Obras Públicas, Transportes y Telecomunicaciones (2000). *Política y Plan de Transporte Urbano para Santiago 2000-2010*. Santiago: Comité Asesor del Ministro de Obras Públicas, Transportes y Telecomunicaciones.
- Contreras, E. (2017). *Actualización de la tasa social de descuento*. Ministerio de Hacienda de Paraguay.
- Coordinador Eléctrico Nacional (2020). *Estándar de ciberseguridad para el sector eléctrico*.
- CPUC (2013). *Biennial report on impacts of distributed generation*. California, Estados Unidos: California Public Utilities Commission.
- CPUC (2020). "Rule 21 Interconnection". *California Public Utilities Commission* [en línea]. Disponible en <https://www.cpuc.ca.gov/Rule21/>
- CREG (2015). *Resolución n.º 197 de 2015. Por la cual se modifica la Resolución CREG 171 de 2015*. Bogotá D. C., Colombia: Comisión de Regulación de Energía y Gas.
- Crotte Alvarado, A., Arvizu, C. y Garduño, J. (2018). *Sistema electrónico de pago de pasajes (SEPP) de transporte público urbano*. Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

## D

- DCC (2019). *Annual report 2019*. Londres, Reino Unido: Data Communications Company.
- DCC (2020a). "About". *Data Communications Company* [en línea]. Disponible en <https://www.smartdcc.co.uk/about/>
- DCC (2020b). "What we do". *Data Communications Company* [en línea]. Disponible en <https://www.smartdcc.co.uk>
- De Rus, G. (2010). *Introduction to cost-benefit analysis. Looking for reasonable shortcuts*. Northampton, Massachusetts, USA: Edward Elgar Publishing, Inc.
- Debnath, A., Chin, H., Haque, M. y Yuen, B. (2014). "A methodological framework for benchmarking smart transport cities". *Cities*, 47-56.
- Decker, C., Berchtold, M., Weill Chaves, L., Beigl, M., Roehr, D., Riedel, T., ...Herzig, D. (2008). "Cost-benefit model for smart items in the supply chain". En L. M. Floerkemeier C., *The internet of things. Lecture notes in Computer Science*. (vol. 4952). Berlin: Springer. Disponible en [https://doi.org/10.1007/978-3-540-78731-0\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-540-78731-0_10).
- Deloitte (2017). "The rise of mobility as a service". Reshaping how urbanites get around. Reino Unido: Deloitte Review.
- Department for Business, Energy & Industrial Strategy (2018). *Smart Metering Implementation Programme. Review of the data access and privacy framework*. Londres, Reino Unido: Department for Business, Energy & Industrial Strategy.

Department for Business, Energy & Industrial Strategy (2020). *Smart meter statistics in Great Britain: quarterly report to end March 2020*. Londres, Reino Unido: Department for Business, Energy & Industrial Strategy.

DHL (2013). *Big data in logistics*. Diciembre.

DHL (2019a). "Smart is the future: how technology is shaping the world of smart logistics". *DHL Smart Trucking*. Consultado en <https://www.dhlsmartrucking.com/knowledge-center-article/technology-enabling-smart-logistics>

DHL (2019b). "Making long haul trucking fast, secure and reliable". *DHL SmartTrucking* [en línea]. Disponible en <https://www.dhlsmartrucking.com/our-solutions/overview>

DHL (2020a). "Smart by DHL". *DHL SmartTrucking* [en línea]. Disponible en <https://www.dhl.com/in-en/home/press/press-archive/2018/dhl-launches-innovative-road-transportation-across-india.html>

DHL (2020b). "Smart that works for you". *DHL SmartTrucking* [en línea]. Disponible en <https://www.dhlsmartrucking.com/our-solutions/technology>

DHL (2020c). "Digitalization is a turning point in our history". *DHL* [en línea]. Disponible en <https://www.dhl.com/global-en/spotlight/smart-logistics.html>

Diamantoulakis, P., Kapinas, V. y Karagiannidis, G. (2015). "Big data analytics for dynamic energy management in smart grids". *Big Data Research*, 94-101.

Digital Transport & Logistics Forum (2020a). "Policy objectives". *Digital Transport & Logistics Forum* [en línea]. Disponible en <https://www.dtlf.eu/about-us/policy-objectives>

Digital Transport & Logistics Forum (2020b). "Themes". *Digital Transport & Logistics Forum* [en línea]. Disponible en <https://www.dtlf.eu/themes/business-processes-and-technical-standards/developing-interoperable-digital-information>

Digital Transport & Logistics Forum (2020c). *Developing interoperable digital information systems to optimise cargo flows along transport corridors*. Disponible en <https://www.dtlf.eu/themes/business-processes-and-technical-standards/developing-interoperable-digital-information>

DOE (2013). *Analysis of vendor payments through the smart grid investment grant and smart grid demonstration projects as of March 2012*. Washington, D. C., Estados Unidos: Departamento de Energía de los Estados Unidos.

DOE (2015a). 2015 Progress report for OE ARRA Smart Grid Demonstration Program aggregation of RDSI, SGDP, and SGIG Results. Washington, D. C., Estados Unidos: Departamento de Energía de los Estados Unidos.

DOE (2015b). *Smart grid technologies cut emissions and costs in Ohio*. Washington, D. C.: Departamento de Energía de los Estados Unidos.

DOE (2016a). *California: renewables and distributed energy resources. Energy policy case study*. Washington, D. C., Estados Unidos: Departamento de Energía de los Estados Unidos.

DOE (2016b). *Smart Grid Investment Grant Program final report. Executive summary*. Washington D. C., Estados Unidos: Departamento de Energía de los Estados Unidos.

DOE (2020). *Recovery Act: regional demonstration projects*. Disponible en [https://www.smartgrid.gov/recovery\\_act/program\\_impacts/regional\\_demonstration\\_technology\\_performance\\_reports.html](https://www.smartgrid.gov/recovery_act/program_impacts/regional_demonstration_technology_performance_reports.html)

Dounis, A. I. (2010). "Artificial intelligence for energy conservation in buildings". *Advances in Building Energy Research*, 267-299.

DTP Metropolitano (2020a). "MetroTren Nos". *DTP Metropolitano* [en línea]. Disponible en <http://www.dtpm.gob.cl/index.php/sistema-transporte-publico-santiago/metrotren-nos>

DTP Metropolitano (2020b). "Redbip!". *Tarjeta bip!* [en línea]. Disponible en <https://www.tarjetabip.cl/tarifas.php>

## E

Econometría Consultores (2015). *Desarrollo de una metodología para determinar los costos de racionamiento de los sectores de electricidad y gas natural*. Bogotá D. C.: Unidad de Planeamiento Minero Energético.

Económica Consultores (2016). *Manual de evaluación socioeconómica para el sector transporte en Colombia*. Bogotá: Financiera de Desarrollo Nacional (FDN).

Económica Consultores (2019). *Más allá del diésel: comparación entre la movilidad eléctrica y a GNV en el transporte público colectivo de pasajeros en áreas urbanas*. Bogotá: Naturgas.

Electricidad (2015). "Sistema de metro sin conductor ahorra 30 % de energía". *Electricidad, la revista energética de Chile*. Disponible en <https://www.revistaei.cl/reportajes/sistema-de-metro-sin-conductor-ahorra-30-de-energia/>



Eliasson, J. (2008). "Lessons from the Stockholm congestion charging trial". *Transport Policy*, 395-404.

Eliasson, J. (2009). *Forecasting travel time variability*. Munich: University Library of Munich.

Eliasson, J. (2014). *The Stockholm congestion charges: an overview*. Estocolmo, Suecia: Centre for Transport Studies.

Eliasson, J., Hultkrantz, L., Nerhagen, L. y Smidfelt, L. (2009). "The Stockholm congestion – charging trial 2006: Overview of effects". *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 240-250.

Ellison, L. (2019). *Hammerson-supported tech start-up brings artificial intelligence to Bullring shopping centre*. LinkedIn. Disponible en <https://www.linkedin.com/pulse/hammerson-supported-tech-start-up-brings-artificial-bullring-ellison/>

Encyclopedia Britannica (2020). "California state, United States". *Britannica* [en línea]. Disponible en <https://www.britannica.com/place/California-state>

Energía Estratégica (2020). "Uruguay superó 252.000 medidores inteligentes conectados y ahora se concentra en Blockchain". *Energía Estratégica* [en línea]. Disponible en <https://www.energiaestrategica.com/uruguay-supero-los-252000-medidores-inteligentes-conectados-y-ahora-se-concentra-en-el-desarrollo-de-una-plataforma-blockchain/>

Euromonitor Consulting (2018). "Shortening the last mile: winning logistics strategies in the race to the urban consumer". *DHL* [en línea]. Disponible en <https://www.dhl.com/content/dam/dhl/local/global/core/documents/pdf/g0-core-wp-shortening-the-last-mile-en.pdf>.

## F

Federal Highway Administration (2017). *Lessons learned from international experience in congestion pricing*. Disponible en <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop08047/02summ.htm>

Ferretti, M. y Schiavone, F. (2016). "Internet of things and business processes redesign in seaports: the case of Hamburg". *Business Process Management Journal*, 22(2), 271-284.

Forge, S. y Khuong, V. (2020). "Forming a 5G strategy for developing countries: a note for policy makers". *Telecommunications Policy*, Elsevier, vol. 44(7).

## G

Galeano, J. (2016). *Análisis del costo marginal de los fondos públicos para Paraguay mediante un modelo de equilibrio general computado*. Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Económicas. Disponible en [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/55561/Documento\\_completo\\_.pdf-PDFA.pdf?sequence=3&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/55561/Documento_completo_.pdf-PDFA.pdf?sequence=3&isAllowed=y).

García Zaballos, A., Iglesias Rodríguez, E., Cave, M., Elbittar, A., Guerrero, R., Mariscal, E. y Webb, W. (2020). *The impact of digital infrastructure on the consequences of COVID-19 and on the mitigation of future effects*. Washington, D. C., Estados Unidos: Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

GEB (2020). ¿Cómo funciona la cadena de prestación del servicio de energía eléctrica en Colombia? *GEB* [en línea]. Preguntas frecuentes. Disponible en <https://www.grupoenergiabogota.com/eeb/index.php/en/company/preguntas-frecuentes>

Gobierno de Colombia (2015). "Colombia's INDC – UNFCCC". *INDC*. Disponible en <http://www4.unfccc.int/submissions/INDC>

Goodall, W., Dovey Fishman, T., Bornstein, J. y Bonthron, B. (2017). "The rise of mobility as a service. Reshaping how urbanites get around". *Deloitte Review*, vol. 20. Disponible en <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/nl/Documents/consumer-business/deloitte-nl-cb-ths-rise-of-mobility-as-a-service.pdf>

Goodwin, R. y Wigersma, D. (2020). *The future of work. Navigating the landscape of remote work*. Deloitte. Disponible en <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ch/Documents/tax/deloitte-ch-covid-19-global-mobility-update-the%20future%20of%20work-sept-2020.pdf>

Gottschalk, M., Usler, M. y Delfs, C. (2017). *The use case and smart grid architecture model approach*. Oldenburg: SpringerBriefs in Energy.

Grid Edge (2020a). "Our technology". *Grid Edge*. Disponible en <https://www.gridedge.co.uk/our-technology-1>

Grid Edge (2020b). "Predict, optimise and control your building's energy profile". *Change the way you use energy*.

Gschwender, A., Munizaga, M. y Simonettia, C. (2016). "Using smart card and GPS data for policy and planning: the case of Transantiago". *Research in Transportation Economics*, 242-249.

Guang, F., He, Y. y Wen, L. (2019). "Impacts of hybrid time-varying tariffs on residential electricity demand: the case of Zhejiang Province". *Utilities Policy*, 61.

Gutiérrez Puebla, J., Benítez, C., Leaño, J. M., García Palomares, J. C., Condeço Melhorado, A., Mojica, C., . . . Romanillos Arroyo, G. (2019). *Cómo aplicar big data en la planificación del transporte urbano. El uso de datos de telefonía móvil en el análisis de la movilidad*. Washington, D. C.: Banco Interamericano de Desarrollo. Disponible en <http://dx.doi.org/10.18235/0002009>

## H

Haque, M., Chin, H. y Debnath, A. (2013). “Sustainable, safe, smart—three key elements of Singapore’s evolving transport policies”. *Transport Policy*, 20-31.

Harberger, A. (1967). “Techniques of project appraisal”. *National Bureau of Economic Research* (págs. 131-142). Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos: NBER.

Heeks, M., Reed, S., Tafiri, M. y Prince, S. (2018). “The economic and social costs of crime”. *Research Report 99*. Home Office.

Heikkilä, S. (2014). *Mobility as a service. A proposal for action for the public administration, case Helsinki*. Helsinki, Finlandia.

Heilig, L., Schwarze, S. y Vob, S. (2017). “An analysis of digital transformation in the history and future of modern ports”. *Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences*.

Hernández Díaz, G. (2019). “El valor social del tiempo en Colombia”. *Archivos de Economía. Documento 499*. Disponible en <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Estudios%20Economicos/499.pdf>.

HM Treasury (2020). *The green book. Central government guidance on appraisal and evaluation*. Disponible en [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/938046/The\\_Green\\_Book\\_2020.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/938046/The_Green_Book_2020.pdf)

Holmgren, J. (2018). “Using cost-benefit analysis to evaluate city logistics initiatives. An application to freight consolidation in small and mid-sized urban areas”. *City Logistics*, 2, 271-290.

HPA (s. f.). “SmartPort – the intelligent port”. *Hamburg Port Authority* [en línea]. Consultado en junio de 2020 en <https://www.hamburg-port-authority.de/en/hpa-360/smartport/>

Hur, Y. (2009). “Working toward the world’s best customs”. *APWIN*, 10, 183-192.

## I

IFC (2020). *The impact of COVID-19 on logistics*. Corporación Financiera Internacional, Grupo del Banco Mundial.

Intel (2005). “Excerpts from a conversation with Gordon Moore: Moore’s Law”. Video transcript. Intel. Disponible en [http://large.stanford.edu/courses/2012/ph250/lee1/docs/Excerpts\\_A\\_Conversation\\_with\\_Gordon\\_Moore.pdf](http://large.stanford.edu/courses/2012/ph250/lee1/docs/Excerpts_A_Conversation_with_Gordon_Moore.pdf)

IRENA (2015). *Smart grids and renewable resources. A cost-benefit analysis guide for developing countries*. Agencia Internacional de la Energía Renovable. Disponible en <https://www.irena.org/publications/2015/Oct/Smart-Grids-and-Renewables-A-cost-benefit-analysis-guide-for-developing-countries>.

ISO (2015). *ISO 14813-1: Intelligent transport systems - Reference model architecture(s) for the ITS sector. Part 1: ITS service domains, service groups and services*. Suiza: International Standard Organization. Disponible en <https://www.iso.org/standard/57393.html>

## J

Jittrapirom, P., Caiati, V., Feneri, A.-M., Ebrahimigharehbaghi, S., Alonso González, M. y Narayan, J. (2017). “Mobility as a service: a critical review of definitions, assessments of schemes, and key challenges”. *Urban Planning*, 13-25.

## K

Kamargianni, M. y Matyas, M. (2017). “The business ecosystem of mobility-as-a-service”. *96th Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting*, (págs. 8-12). Washington D. C.

Kayikci, Y. (2018). “Sustainability impact of digitization in logistics”. *Procedia Manufacturing*, 21, 782-789.

Khan, S. M. (2019). “Connected and automated vehicles in urban transportation cyber-physical systems”. *All Dissertations 2475*.

Khan, S., Chowdhury, M., Morris, E. y Deka, L. (2019). “Synergizing roadway infrastructure investment with digital infrastructure for infrastructure – Based connected vehicle applications: review of current stats and future directions”. *ASCE Journal of Infrastructure Systems*, 25(4).

Korea Customs Service (2018). *UNI-PASS*. Disponible en [https://unctad.org/system/files/non-official-document/dtl\\_eWeek2018p78\\_KeunhooLee\\_en.pdf](https://unctad.org/system/files/non-official-document/dtl_eWeek2018p78_KeunhooLee_en.pdf).

Korzhenevych, A., Dehnen, N., Bröcker, J., Holtkamp, M., Meier, H., Gibson, G. y Cox, V. (2014). *Update of the handbook on external costs of transport. Final report*. Comisión Europea.

Kühn, O., Axel, J. y Michael, S. (2019). "Blockchain adoption at German logistics service providers". *Artificial intelligence and digital transformation in supply chain management: innovative approaches for supply chains. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)*.

Kuzlu, M., Pipattanasomporn, M. y Rahman, S. (2014). "Communications network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN". *Computer Networks*, 67, 74-88.

## L

La Vanguardia (2020). "Catalunya probará la movilidad del futuro". *La Vanguardia* [en línea]. Edición del 22 de junio, disponible en <https://www.lavanguardia.com/local/catalunya/20200622/481837744938/catalunya-probara-movilidad-futuro-brl.html>

Leiva Moya, M. (2014). *Estimación de precios sociales para proyectos de transporte en Uruguay*. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemática. Departamento de Ingeniería Industrial. Disponible en [https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116140/cf-leiva\\_mm.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116140/cf-leiva_mm.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

Lewis, D. y Kerr, J. (2015). "Not too clever: will smart meters be the next government IT disaster?" *IoD Policy Report*. Londres, Reino Unido: IoD.

Li, X. (2020). "Reducing channel costs by investing in smart supply chain technologies". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 137(C).

LUCA (2020). "LUCA Transit: Plan de movilidad para Neuquén". *LUCA* [en línea]. Disponible en <https://luca-d3.com/es/inteligencia-artificial-ejemplos/plan-movilidad-neuquen>

## M

Mari, A. (2020). "São Paulo subway facial recognition system slammed over user data security, privacy". *ZDNet* [en línea]. Consultado el 14 de octubre de 2020 en <https://cacm.acm.org/news/246039-so-paulo-subway-facial-recognition-system-slammed-over-user-data-security-privacy/fulltext>

MEF (2006). *Análisis costo-beneficio del proyecto de ley de presupuesto del sector público para el año fiscal 2006*. Ministerio de Economía y Finanzas. Disponible en [https://www.mef.gob.pe/contenidos/presu\\_publ/sectr\\_publ/proye\\_2006/AnalisisCostoBeneficioProyLeyPpto2006.pdf](https://www.mef.gob.pe/contenidos/presu_publ/sectr_publ/proye_2006/AnalisisCostoBeneficioProyLeyPpto2006.pdf).

MEF (2017). *Anexo n.º 3 Parámetros de evaluación social*. Ministerio de Economía y Finanzas, Disponible en [https://www.mef.gob.pe/contenidos/archivos-descarga/anexo3\\_directiva002\\_2017EF6301.pdf](https://www.mef.gob.pe/contenidos/archivos-descarga/anexo3_directiva002_2017EF6301.pdf)

Mideplan (2019). *Precios sociales en Costa Rica*. Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica. Disponible en <https://www.mideplan.go.cr/precios-sociales>

Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación (2019). "Qué es la UE". *Gobierno de España* [en línea]. Representación de España en la UE. Disponible en <http://www.exteriores.gob.es/RepresentacionesPermanentes/EspanaUE/es/quees2/Paginas/default.aspx>

Ministerio de Desarrollo Social y Familia (2021). *Precios sociales 2021*. Departamento de metodologías, División de Evaluación Social de Inversiones, Subsecretaría de Evaluación Social. Disponible en <http://sni.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/download/precios-sociales-vigentes-2017/?wpdmdl=2392>

Ministerio de Energía (2015). *Energía 2050. Política energética de Chile*. Santiago: Comité Consultivo de Energía 2050. Gobierno de Chile.

Ministerio de Energía (2018). *Ruta Energética 2018-2022: "Liderando la modernización con sello ciudadano"*. Santiago: Gobierno de Chile.

Ministerio de Industria, Energía y Minería (2015). *Plan Nacional de Eficiencia Energética 2015-2024*. Montevideo.

Ministerio de Industria, Energía y Minería (2020). "Presentación del balance energético nacional 2019". *Ministerio de Minas y Energía de Uruguay* [en línea]. Noticias. Disponible en <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/noticias/presentacion-del-balance-energetico-nacional-2019>

Ministerio de Minas y Energía (2018). *Resolución 4 0072 de 2018. Por la cual se establecen los mecanismos para implementar la infraestructura de medición avanzada en el servicio público de energía eléctrica*. Bogotá D. C.: Comisión de Regulación de Energía y Gas.



Ministerio de Minas y Energía (2019). *Resolución 4 0483 de 2019. Por la cual se modifica la Resolución 1 0072 de 2018*. Bogotá D. C., Colombia: Diario Oficial.

Ministerio de Planificación del Desarrollo (2006). *Resolución ministerial razones precio cuenta. Resolución n.º 159*. Dirección General de Inversión Pública.

Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (2020). "División de Transporte Público Regional". *DTPR*. Disponible en <http://www.dtpcr.gov.cl/ley-20-378-y-marco-legal>

Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (2013). *Resolución exenta 1860. Aprueba convenio suscrito entre el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones y METRO S.A.* Santiago, Chile: Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones.

MinMinas (2020). "Parque de generación continúa atendiendo demanda eléctrica con plantas térmicas como respaldo ante disminución de las lluvias. Generadores hidráulicos deben incrementar el embalsamiento de agua para el verano 2020-2021". *Minenergía* [en línea]. Boletín Informativo. Disponible en <https://www.minenergia.gov.co/web/10180/historico-de-noticias?idNoticia=24198068>

MinMinas, UPME y BID (2016). "Estudio: Smart Grids Colombia Visión 2030. Mapa de ruta para la implementación de redes inteligentes en Colombia". *UPME 25* [en línea]. Disponible en <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Smart-Grids-Colombia-Visión-2030.aspx>

Moore, G. E. (1965). "Cramming more components into integrated circuits". *Electronics*, 38(8).

Munizaga, M. (2010). *Public transport OD matrix estimation from smart card payment system data*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.

## N

Naciones Unidas (2020). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Disponible en <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Neuquen Capital (2020). *Big data: en la confluencia se generan 550 mil viajes por día y casi el 55 % se moviliza en auto particular*. Disponible en <http://www.ciudaddeneuquen.gob.ar/prensa/2017/09/26/big-data-la-confluencia-se-generan-550-mil-viajes-dia-casi-55-se-moviliza-auto-particular/>

Niels, H. y Mortiz, P. (2017). "Blockchain in logistics and supply chain: trick or treat?" *Digitalization in supply chain management and logistics: smart and digital solutions for an industry 4.0 environment. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics*.

Nielsen, E. y Alkemade, F. (2016). How is value created and captured in smart grids? A review of the literature and an analysis of pilot projects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 629-638.

NIST (2011). *The NIST definition of cloud computing*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.

NIST (2014). *NIST framework and roadmap for smart grid interoperability standards, release 3.0*. Estados Unidos: National Institute of Standards and Technology.

## O

Öberg, M., Nilsson, K. y Johansson, C. (2016). "Governance of major transport corridors involving stakeholders". *Transportation Research Procedia*, 14, 860-868.

OCDE (2014). *The cost of air pollution: health impacts of road transport*. París: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264210448-en>.

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

OCDE (2020). "COVID-19 in Latin America and the Caribbean: regional socio-economic implications and policy priorities". *Policy Responses to Coronavirus (COVID-19)*. OCDE. Disponible en <https://www.oecd.org/coronavirus/policy-responses/covid-19-in-latin-america-and-the-caribbean-regional-socio-economic-implications-and-policy-priorities-93a64fde/>

Oficina de Planeamiento y Presupuesto (2019). *Presente y futuro de las energías renovables en Uruguay*. Montevideo.

Oficina de Planeamiento y Presupuesto de la Presidencia (2014). *Precios sociales y pautas técnicas para la evaluación socioeconómica*. Sistema Nacional de Inversión Pública (SNIP). Disponible en <https://www.bps.gub.uy/bps/file/13505/1/snip-precios-sociales-y-pautastecnicas.pdf>

OMS (2021). “Calidad del aire y salud. Datos y cifras”. *Organización Mundial de la Salud* [en línea]. Centro de prensa. Notas descriptivas. Disponible en [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Oort, N. V. y Cats, O. (2015). “Improving public transport decision making, planning and operations by using big data cases from Sweden and the Netherlands”. IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, *Intelligent Transportation Systems*, 19–24.

Osinermin (2012). *Estimación del costo de racionamiento para el sector eléctrico peruano*. Lima: Gerencia Adjunta de Regulación Tarifaria. Organismo Superior de la Inversión en Energía y Minería.

## P

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea (2006). *Directiva 2006/32/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. Sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos y por la que se deroga la Directiva 93/76/CEE del Consejo*. Bruselas, Bélgica: Diario Oficial de la Unión Europea.

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea (2009). *Directiva 2009/72/CE del Parlamento Europeo y el Consejo. Sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad y por la que se deroga la Directiva 2003/54/CE*. Bruselas, Bélgica: Diario Oficial de la Unión Europea.

Parlamento Europeo y Consejo Europeo (2010). *Directiva 2010/40/UE del Parlamento Europeo y del Consejo. Por la que se establece el marco para la implantación de los sistemas de transporte inteligentes en el sector del transporte por carretera y para las interfaces con otros modos de transporte*. Bruselas, Bélgica: Unión Europea.

Paulos, B. (2018). *The growth of distributed energy. Implications for California*. Estados Unidos: Next 10.

Perallos, A., Hernández-Jayo, U., Onieva, E. y García Zuazola, I. J. (2016). (eds.). *Intelligent transport systems*. Londres: Wiley.

Pigou, A. (1920). *The economics of welfare*. Londres, Reino Unido: Macmillan & Co.

Pilkington, M. (2016). “Blockchain technology: principles and applications”. En *Research handbook on digital transformations*. Edward Elgar Publishing.

Piraquive, G., Matamoros, M., Cespedes, E. y Rodríguez, J. (2018). “Actualización de la tasa de rendimiento del capital en Colombia bajo la metodología Harberger”. *Archivos de Economía, documento 487*.

Port of Hamburg (2020). *Port of Hamburg handling figures*. Consultado en junio de 2020 en <https://www.hafen-hamburg.de/en/statistics>

Prud’homme, R. y Bocarejo, J. P. (2005). “The London congestion charge: a tentative economic appraisal”. *Transport Policy*, 12(3), 279–289.

PV Magazine (2020). “Energía renovable para el metro de São Paulo, en Brasil”. *PV magazine* [en línea]. Disponible en <https://www.pv-magazine-latam.com/2020/08/11/energia-renovable-para-el-metro-de-sao-paulo-en-brasil/>

## Q

Queiroz, M. y Fosso, S. (2019). “Blockchain adoption challenges in supply chain: an empirical investigation of the main drivers in India and the USA”. *International Journal of Information Management*, 46, 70 – 82.

Quezada, R. y Amaro Yazim, B. (2016). *Análisis de seguridad de la tarjeta Bip! chilena como medio de pago*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.

## R

Railway Technology (2021). “São Paulo Metro”. *Railway Technology* [en línea]. Projects. Disponible en <https://www.railway-technology.com/projects/saopaulometro/>

Ramboll (2019). *WHIMPACT insights from the world’s first mobility-as-a-service (MaaS) system*. Copenhagen, Dinamarca: Ramboll.

Ramjerdi, F. (1995). *Road pricing and toll financing*. Oslo: Institute of Transport Economics.

Rendón, J. (enero de 2020). *Nueva generación de modelos de transporte a través del uso de big data: Caso San Salvador*. Washington, Estados Unidos: Banco Interamericano de Desarrollo.

Rendón, J., Hernández, E. y Del Río, H. (2020). *Nueva generación de modelos de transporte a través del uso de big data: caso San Salvador*. Washington, D. C.: Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Disponible en <http://dx.doi.org/10.18235/0002130>.

Revesz, A., Jones, P., Dunham, C., Davies, G., Marques, C., Matabuena, R., ... Maidment, G. (2020). "Developing novel 5th generation district energy networks". *Energy*, 1-14.

Rodríguez Ylasaca, E. (2012). *Análisis del costo marginal de los fondos públicos para Chile*. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Disponible en [https://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2012/cf-rodriguez\\_ey/pdfAmont/cf-rodriguez\\_ey.pdf](https://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2012/cf-rodriguez_ey/pdfAmont/cf-rodriguez_ey.pdf)

Rojko, A. (2017). *Industry 4.0 concept: background and overview*. ECPE European Center for Power Electronics.

Roman, J. y Farrell, G. (2002). "Cost-benefit analysis for crime prevention: opportunity costs, routine savings and crime externalities". *Crime Prevention Studies*, 14, 53-92.

## S

Safa, P., Weeks, K., Safa, M. y Zelbst, P. (2019). "How digitalization and IoT can improve the operations of Panama Canal". *Journal of Business and Management Sciences*, 7(3), 140-146.

Sandmo, A. (1976). "Optimal taxation: an introduction to the literature". *Journal of Public Economics*, 6(1-2), 37-54.

Santander Trade (2019). *Cifras del comercio exterior en Corea del Sur*. Consultado en junio de 2020 en <https://santandertrade.com>: [https://santandertrade.com/es/portal/analizar-mercados/corea-del-sur/cifras-comercio-exterior?&actualiser\\_id\\_banque=oui&id\\_banque=12&memoriser\\_choix=memoriser](https://santandertrade.com/es/portal/analizar-mercados/corea-del-sur/cifras-comercio-exterior?&actualiser_id_banque=oui&id_banque=12&memoriser_choix=memoriser)

Schirmer, I., Drews, P., Saxe, S., Baldauf, U. y Tesse, J. (2016). "Extending enterprise architectures for adopting the internet of things – Lessons learned from the smartPort projects in Hamburg". *International Conference on Business Information Systems*, 169-180.

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

SEC (2020). "About the Smart Energy Code". *Smart Energy Code Company* [en línea]. Disponible en <https://smartenergycodecompany.co.uk/about-the-smart-energy-code/>.

Secretaría de Hacienda y Crédito Público (2014). *Tasa social de descuento*. Gobierno de México [en línea]. Disponible en <https://www.gob.mx/shcp/documentos/tasa-social-de-descuento-tsd>

Secretaría de Programación Económica (1996). *Resolución n.º 110/96. Anexo 1. Proyectos de inversión pública nacional. Cálculo de precios de cuenta*. Disponible en <https://www.economia.gov.ar/digesto/pdf/cap11.pdf>.

Secretaría del Estado (2013). *Smart Energy Code*. Londres: Reino Unido.

Secretaria Distrital de Ambiente (2010). *Plan decenal de descontaminación del aire para Bogotá*. Bogotá: Secretaría Distrital de Ambiente, Transmilenio S.A y Universidad de los Andes.

Sharma, P. (2013). "Evolution of mobile wireless communication networks-1G to 5G as well as future prospective of next generation communication network". *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2(8), 47-53.

Sierra Delgado, A., Rodríguez Villalón, O. y León Sánchez, M. (2020). "Análisis tecnoeconómico de la operación en esquema de red inteligente y reserva energética en usuarios conectados a paneles fotovoltaicos". *Repositorio de la Red Internacional de Investigadores en Competitividad*, 13 (736-756).

Sim, R. (2014). "LTA awards \$68 million contract for a common bus fleet management system". *The Straits Times* [en línea]. Disponible en <https://www.straitstimes.com/singapore/transport/lta-awards-68-million-contract-for-a-common-bus-fleet-management-system>

Sovacool, B., Kivimaa, P., Hielscher, S. y Jenkins, K. (2017). "Vulnerability and resistance in the United Kingdom's smart meter transition". *Energy Policy*, 767-781.

Statista (2020). "E-commerce market value India 2014-2027". *Statista* [en línea]. Disponible en <https://www.statista.com/statistics/792047/india-e-commerce-market-size/>

Strand, J. (2009). "Revenue management effects related to financial flows generated by climate policy". Background paper to the 2010 World Development Report 5053. Banco Mundial. Disponible en <https://documents1.worldbank.org/curated/en/228011468330916898/pdf/WPS5053.pdf>.

## T

Torres, G., Hernández, S., González, J. y Arroyo, J. (2020). “Estimación del valor del tiempo de los ocupantes de los vehículos que circulan por la red carretera de México”. *Notas n.º 182*, enero-febrero, artículo 1. Disponible en <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=498&IdBoletin=182>.

## U

UIT (2003). *Recomendación UIT-R M.1645 (06/2003). Marco y objetivos generales del desarrollo futuro de las IMT-2000 y de los sistemas posteriores*.

UIT (2012). *Recomendación UIT-T Y.2060. Descripción general de internet de los objetos*. Ginebra, Suiza: Unión Internacional de las Telecomunicaciones.

UIT (2014). *ITU-T Rec. Y.3500. Information technology, cloud computing, overview and vocabulary*. Ginebra: Unión Internacional de las Telecomunicaciones.

UIT (2015a). *Recomendación UIT-R M.2083-0. Concepción de las IMT. Marco y objetivos generales del futuro desarrollo de las IMT para 2020 y en adelante*. Ginebra, Suiza: Unión Internacional de las Telecomunicaciones.

UIT (2015b). *Recomendación UIT-T Y.3600. Global information infrastructure, internet protocol aspects and next-generation networks cloud computing*. Ginebra, Suiza.

UIT (2016). “Could technical standards for artificial intelligence help us achieve the Sustainable Development Goals?”. *ITUBlog*. Consultado el 15 de abril de 2017 en <https://itu4u.wordpress.com/2016/09/13/could-technical-standards-for-artificial-intelligence-help-us-achieve-the-sustainable-development-goals/>

UIT (2017). *Artificial intelligence*. Unión Internacional de las Telecomunicaciones. Consultado el 15 de abril de 2017 en <http://www.itu.int/en/ITU-T/AI/Pages/default.aspx>

UIT (2018). *Recomendación UIT-R M.2012-3 (01/2018). Especificaciones detalladas de las interfaces radioeléctricas terrenales de las telecomunicaciones móviles internacionales-avanzadas (IMT-Avanzadas)*.

UIT-T (2004). *Recomendación UIT-T Q.1761 - Principios y requisitos para la convergencia de los sistemas fijos y los sistemas IMT-2000 existentes*. Ginebra (Suiza): UIT-T (Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT).

Unión Europea (2011). *Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte: por una política de transportes competitiva y sostenible. Libro Blanco*. Bruselas, Bélgica: Unión Europea.

Unión Europea (2013). *Reglamento (UE) n.º 1315/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo sobre las orientaciones de la Unión para el desarrollo de la Red Transeuropea de Transporte, y por el que se deroga la Decisión n.º 661/2010/UE*. Bruselas, Bélgica: Unión Europea.

Unión Europea (2015). *Decisión de la Comisión C(2015) 2259 final. Setting-up an expert group on digital transport and logistics (‘the Digital Transport and Logistics Forum’)*. Bruselas, Bélgica: Unión Europea.

Unión Europea (2017). “EU and EEA member States sign up for cross border experiments on cooperative, connected and automated mobility”. *Comisión Europea* [en línea]. Strategy. Digital Single Market. Disponible en <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/eu-and-eea-member-states-sign-cross-border-experiments-cooperative-connected-and-automated>

Unión Europea (2019). “Transporte seguro, sostenible y conectado”. *Transportes*. Disponible en [https://europa.eu/european-union/topics/transport\\_es](https://europa.eu/european-union/topics/transport_es)

Unión Europea (2020a). *Los 27 países miembros de la UE*. Consultado en [https://europa.eu/european-union/about-eu/countries\\_es](https://europa.eu/european-union/about-eu/countries_es)

Unión Europea (2020b). “Datos y cifras sobre la vida en la Unión Europea. Superficie y población”. *Unión Europea* [en línea]. Principios, países, historia. Hechos y cifras clave. Disponible en [https://europa.eu/european-union/about-eu/figures/living\\_es](https://europa.eu/european-union/about-eu/figures/living_es)

Unión Europea (2020c). “Trans-European Transport Network (TEN-T)”. *Mobility and transport*. Disponible en [https://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/ten-t\\_en](https://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/ten-t_en)

Unión Europea (2020d). “Europe boosts investment with €70 million in 5G with strong focus on connected transport by launching 11 new projects”. *Shaping Europe’s digital future*. Disponible en <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/europe-boosts-investment-eu70-million-5g-strong-focus-connected-transport-launching-11-new>

Unión Europea (2020e). “Cross-border corridors for connected and automated mobility (CAM)”. *Shaping Europe’s digital future*. Disponible en <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/cross-border-corridors-connected-and-automated-mobility-cam>

Universidad de los Andes y UCL (2013). *Cobros de congestión en ciudades colombianas*. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes y University College London.

UOL (2019). “Cadê o condutor? Entenda a tecnologia por trás do metrô que anda sozinho”. *UOL. A tecnologia por trás...* Disponible en <https://www.uol.com.br/tilt/noticias/redacao/2019/02/07/cade-o-condutor-entenda-a-tecnologia-por-tras-do-metro-que-anda-sozinho.htm>

UPEFE (2013). *Plan de Ejecución Metropolitano Pem Neuquén*. Neuquén, Argentina: Unidad Provincial de Enlace y Ejecución de Proyectos con Financiamiento Externo.

UPME (2015). *Plan Energético Nacional Colombia: Ideario energético 2050*. Bogotá D. C., Colombia: Unidad de Planeación Minero Energética.

UPME (2018). *Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano – Agosto de 2018*. Subdirección de Energía Eléctrica – Grupo de Generación. Bogotá D. C., Colombia: Unidad de Planeación Minero-Energética.

US Department of Transportation (2014). *Revised departmental guidance on valuation of travel time in economic analysis. Memorandum to secretarial officers*. Obtenido de <https://imtmx/resumen-boletines.html?IdArticulo=498&IdBoletin=182>

UTE (2019). “UTE y la Agenda Digital: 50 % de medidores inteligentes en 2020”. *UTE* [en línea]. Disponible en <https://www.ute.com.uy/noticias/ute-y-la-agenda-digital-50-de-medidores-inteligentes-en-2020>

UTE (2020a). “Medición inteligente”. *UTE* [en línea]. Disponible en <https://www.ute.com.uy/medicion-inteligente>

UTE (2020b). “Movilidad eléctrica”. *UTE* [en línea]. Disponible en <https://movilidad.ute.com.uy/carga.html>

UTE (2020c). “Plan Inteligente ¿qué es?”. *UTE* [en línea]. Soluciones para el hogar. Disponible en <https://www.ute.com.uy/clientes/soluciones-para-el-hogar/planes-hogar/plan-inteligente?tab=2>

## V

Verdejo, H. y Becker, C. (2020). “The erratic implementation of measuring, monitoring and control system (MMCS) in Chile: the crisis on smart meters”. *Energy Reports*, 6:2140-2145. Elsevier.

Vickrey, W. (1969). “Congestion theory and transport investment”. *American Economic Review*, 59(2), 251-260.

## W

WEF (2016a). *Digital transformation of industries: electricity*. Ginebra, Suiza: Foro Económico Mundial.

WEF (2016b). *Digital transformation of industries: Logistics industry*. Foro Económico Mundial.

WEF (2020a). “Coronavirus has exposed the digital divide like never before”. *World Economic Forum* [en línea]. Disponible en <https://www.weforum.org/agenda/2020/04/coronavirus-covid-19-pandemic-digital-divide-internet-data-broadband-mobbile/>

WEF (2020b). “COVID-19 will accelerate the revolution in energy systems”. *World Economic Forum* [en línea]. Disponible en <https://www.weforum.org/agenda/2020/05/covid-19-accelerate-energy-revolution/>

WEF (2021). “Supply chain and transport”. Strategic Intelligence. Disponible en <https://intelligence.weforum.org/topics/atGb0000000pTDoEAM?tab=publications>

Whim (2018). “One-year old transportation app Whim disrupts the way people move in cities – over 2,5 million trips taken in first year”. *Whim* [en línea]. Disponible en <https://whimapp.com/helsinki/en/one-year-old-transportation-app-whim-disrupts-the-way-people-move-in-cities-over-25-million-tr>

Whim (2020). *All transport in one app*. Obtenido de All transport in one app: <https://whimapp.com/>

Wikipedia (2020a). “Helsinki”. *Wikipedia*. Consultado el 4 de septiembre de 2020 en <https://es.wikipedia.org/wiki/Helsinki>

Wikipedia (2020b). “Estocolmo”. *Wikipedia*. Consultado el 7 de septiembre de 2020 en <https://es.wikipedia.org/wiki/Estocolmo>

Wikipedia (2020c). “India”. *Wikipedia*. Consultado el 7 de septiembre de 2020 en <https://es.wikipedia.org/wiki/India>

## X

XM (2017). *Propuesta de requerimientos técnicos para la integración de fuentes de generación no síncrona al sin*. Gerencia Centro Nacional de Despacho. XM. Disponible en [https://www.xm.com.co/Documents/Propuesta\\_Requerimientos/Propuesta\\_Requerimientos.pdf](https://www.xm.com.co/Documents/Propuesta_Requerimientos/Propuesta_Requerimientos.pdf).

## Y

Yang, C.-S. (2019). "Maritime shipping digitalization: blockchain-based technology applications, future improvements, and intention to use". *Transportation Research Part E*, 108-117.

## Z

Zhang, Y., Huang, T. y Bompard, E. (2018). "Big data analytics in smart grids: a review". *Energy Informatics*, 1(8), 1-24.

Zhou, X. (2013). "Research on logistics value chain analysis and competitiveness construction for express enterprises". *American Journal of Industrial and Business Management*, 3, 131-135.

Zuniga, Y., Kraft, A., Uezono, D., Fajardo, M., Obmana, S., Genuino, A. y Guerrero, A. (2020). "Discount rate determination for economic evaluations in HTA in the Philippines". *European Journal of Public Health*, 30(5).

## #

#infraestructurascovid (mayo de 2020). "Covid19 y la inversión en infraestructuras". *Análisis y Recomendaciones*. Madrid: #infraestructurascovid.



