



Bits y bytes para ahorros de CO₂

**El papel de la digitalización del sector energía
para la protección del clima en México y Alemania**

Bits y bytes para ahorros de CO₂

Título:

Bits y bytes para ahorros de CO₂. El papel de la digitalización del sector energía para la protección del clima en México y Alemania

Autor:

Stephan Franz, Büro F

www.burof.de

Agosto 2018

Acrónimos y abreviaturas

AIE	Agencia Internacional de Energía
BIM	Modelado de Información de Construcción (por las siglas en inglés de <i>Building Information Modelling</i>)
BMWi	Ministerio Federal de Economía y Energía de Alemania
BNEF	<i>Bloomberg New Energy Finance</i>
CENACE	Centro Nacional de Control de Energía
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CRE	Comisión Reguladora de Energía
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONECC	Convergencia de la Política Energética y de Cambio Climático
CONUEE	Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía
DSO	Operador del Sistema de Distribución (por las siglas en inglés de <i>Distribution Grid Operator</i>)
ER	Energías Renovables
ERNC	Energías renovables no-convencionales
UE	Unión Europea
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GIZ	<i>Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit</i> (Cooperación Alemana al Desarrollo Sustentable)
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
kWp	Kilowatt pico
LGCC	Ley General de Cambio Climático
Mt	Megatonelada
MtCO ₂ eq	Megatonelada de dióxido de carbono equivalente
MWh	Megawatt hora
NDC	Contribución Nacionalmente Determinada
PETE	Programa Especial para la Transición Energética
PRODESEN	Programa de Desarrollo del Sector Eléctrico Nacional
PREI	Programa de Redes Eléctricas Inteligentes
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México
TIC	Tecnologías de Información y Comunicación
TSO	Operador del Sistema de Transmisión (por las siglas en inglés de <i>Transmission system operator</i>)
TWh	Terawatt hora
USD	Dólares estadounidenses
VPP	Central Eléctrica Virtual (por las siglas en inglés de <i>Virtual Power Plant</i>)

Resumen Ejecutivo

Al nivel mundial, la digitalización de casi todos los sectores de la vida moderna es vista como una mega tendencia de la primera mitad del siglo XXI y en ocasiones, la “revolución digital” suele describirse como una tercera o cuarta revolución industrial. La Agencia Internacional de Energía (AIE) define la digitalización como “la creciente aplicación de las tecnologías de información y comunicación (TIC) en la economía, incluidos los sistemas energéticos” (IEA, 2017, pág. 22). Dicha definición contempla tres elementos fundamentales:

Datos: aumento de los volúmenes de información digitalizada, gracias a la disminución de los costos de los sensores y del almacenamiento de datos.

Análisis: el uso de datos para producir información y conocimientos útiles impulsado por el rápido progreso de las capacidades informáticas y analíticas avanzadas.

Conectividad: intercambio de datos entre personas, dispositivos y máquinas (incluyendo máquina a máquina), a través de redes de comunicación digitales cada vez más rápidas y baratas.

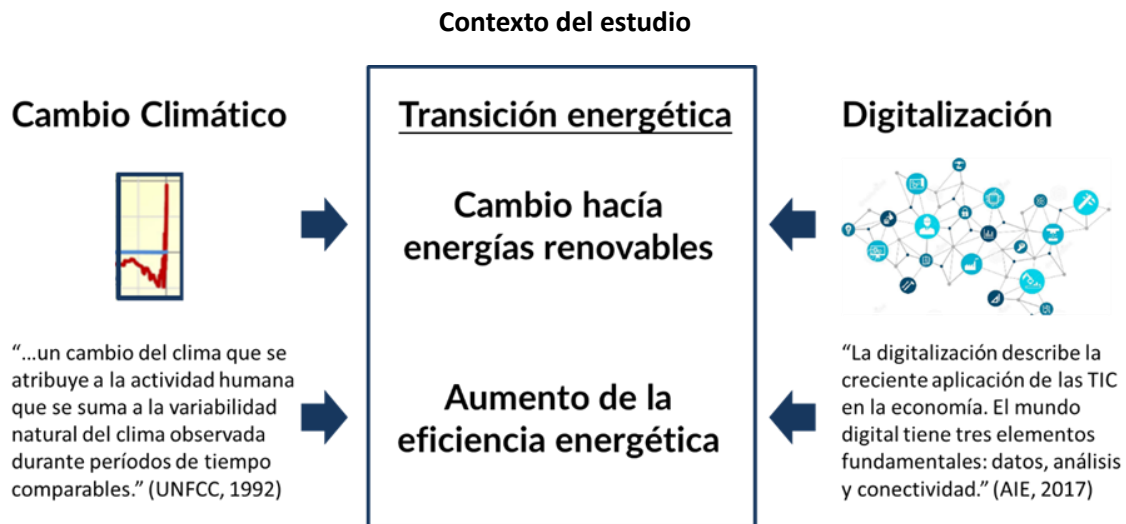
Otra mega tendencia de la primera mitad de este ciclo es la transición energética que consiste, esencialmente, en una descarbonización de la generación de energía eléctrica y de los usos finales de la misma, mediante una mayor participación de energías renovables en la matriz de generación y una mejora de la eficiencia energética. Una de las principales razones de dicha transición energética es la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el sector energético, compuesto de la participación de varios subsectores entre los que destaca la generación de energía eléctrica, la cual constituye el 18% del total de emisiones del país. (INECC, 2018b).

La digitalización implica una interrelación con el sector energético en dos sentidos. Por un lado, los procesos digitales apoyan a la mejor integración de las energías renovables y al aumento de la eficiencia energética. Por el otro, pueden implicar consumos adicionales de energía, derivados de los propios procesos digitales.

A partir de lo anterior, el objetivo de este estudio es analizar las relaciones entre la digitalización y las emisiones de GEI en el sector energético, con énfasis en el subsector eléctrico. Se pretende identificar los ámbitos donde el uso de procesos digitales puede contribuir a la mitigación de GEI, analizando el estado de la discusión en Alemania y la situación en México. Por otra parte, el estudio pretende contribuir a la definición de acciones políticas para el buen uso de la digitalización como herramienta del régimen de mitigación del cambio climático en México. El enfoque de este estudio está centrado en el sector eléctrico y en la eficiencia energética, por la alta relevancia de estos ámbitos para la mitigación de GEI y por el amplio espectro de soluciones digitales disponibles.

El informe no pretende ser exhaustivo ni brindar respuestas a todas las interrogantes sobre el tema, ya que los efectos del cambio climático y de la digitalización en el desarrollo de las sociedades son complejos, interdependientes y variables. Por el contrario, el informe busca contribuir a las discusiones iniciadas en México durante 2018 con la realización de un viaje de estudios a Alemania y la realización de un Foro Internacional sobre Digitalización del sector energía para la protección climática organizado por el proyecto “Convergencia de la Política Energética y de Cambio Climático” (CONECC), y dotar de elementos y experiencias técnicas en torno a los procesos digitales, que podrían ser implementados en México para dichos fines.

Bits y bytes para ahorros de CO₂



Fuente: Elaboración propia

La imprescindible acción climática

La acción climática en los sectores que representan los volúmenes de emisiones de GEI más grandes se vuelve urgente para mitigar los efectos del cambio climático. México fue el primer país en desarrollo en presentar su NDC a nivel nacional ante la CMNUCC, acordando realizar de forma no condicionada acciones de mitigación que resulten en la reducción del 22 por ciento de sus emisiones de GEI al año 2030, en comparación con un escenario *business as usual*, lo cual significa una reducción de alrededor de 210 megatoneladas (Mt) de CO₂e. En México, alrededor del 70 por ciento de las emisiones de GEI del año 2015, se encuentran asociadas al sector energía, incluyendo la generación de energía eléctrica, la extracción y combustión de fósiles y los sectores de consumo final de la energía como el residencial, comercial e industrial.

Ante dicho escenario, México se ha planteado metas para alcanzar una mayor participación de energías limpias. De acuerdo con el primer Reporte Anual de Potencial de Mitigación de la SENER (2018), las proyecciones de capacidad instalada correspondientes a las metas de energías limpias del sector cumplen con la meta no condicionada establecida en la NDC, aunque es necesario ampliar su capacidad de participación en el sistema eléctrico, en particular, de las energías renovables.

La digitalización del sector eléctrico habilita la acción climática en cuanto a que favorece una mayor penetración de las energías renovables y la eficiencia energética en el sistema eléctrico, y crea nuevos esquemas de producción y consumo de la energía que encuentran asociación con las políticas de mitigación necesarias para el sector.

Los siguientes párrafos dan una síntesis de las áreas en las cuales la digitalización puede apoyar en bajar las emisiones en los sectores energéticos, en materia de redes inteligentes, mercados inteligentes y eficiencia energética.

Bits y bytes para ahorros de CO₂

Redes inteligentes

Por “redes inteligentes” se entiende la combinación y acoplamiento de las redes eléctricas con la red informática y de comunicaciones, para que el sistema eléctrico opere proporcionando información en tiempo real y de manera permanente desde todos los puntos (González, 2017). La flexibilidad de las redes eléctricas para una mayor incorporación de energías renovables y promover cambios en la matriz de generación depende en gran medida de esta característica de las redes. Con el objetivo de aprovechar los potenciales de mitigación asociados a las redes inteligentes, se consideran soluciones inteligentes y beneficios potenciales asociados, entre los que destacan:

- **Pronósticos de la generación renovable.** La aplicación de sistemas eficientes de pronósticos de generación de las energías renovables variables es una de las bases para su integración al sistema eléctrico. Para poder aprovechar lo máximo de la capacidad de energías renovables instaladas en un sistema eléctrico, el operador del sistema requiere precisos pronósticos de la generación eólica y fotovoltaica para poder bajar la inyección de plantas fósiles.
- **Operación de redes eléctricas inteligentes.** La incorporación de procesos digitales en las redes de transmisión y distribución favorece un control más inteligente del despacho de energías renovables, evitando congestiones y aprovechando la generación de energías renovables en tiempo real. Asimismo, aplicado a la gestión de la demanda de energía, permite impulsar acciones de eficiencia energética, que permitan evitar emisiones no sólo en la generación, sino en la transmisión y distribución de energía eléctrica.
- **Flexibilización de la demanda eléctrica.** La introducción masiva de medidores inteligentes a nivel de hogares es clave para reducir las pérdidas no técnicas de energía eléctrica, al tiempo que permiten tener un consumo más eficiente de la energía, produciendo así ahorros en el consumo y generación de energía eléctrica. Por otro lado, flexibilizar la demanda eléctrica al nivel de usuarios relevantes es una palanca muy importante para aumentar la capacidad del sistema eléctrico e incorporar fuentes de energía intermitente.
- **Movilidad eléctrica.** Con sistemas de carga inteligente se puede disminuir la necesidad de instalar nuevos equipos de generación y enfrentar obstáculos relevantes de la electrificación y descarbonización del sector transporte.

Mercados inteligentes

Los mercados de energía están en un proceso de cambio, impulsados por la descarbonización de las economías, el despliegue de las energías renovables, así como de procesos regulatorias como la separación de la operación de las redes con la generación de energía y la descentralización de los mercados eléctricos. En los llamados “mercados inteligentes”, se comercializan energía y servicios relacionados a ésta de manera optimizada y automatizada, facilitando así la incorporación de energías renovables a las redes eléctricas y fomentando modelos de negocio para aumentar la eficiencia energética. Este informe identifica las siguientes áreas de desarrollo y sus beneficios potenciales:

- **Negocio a través de intermediarios de mercado (agregadores comerciales y centrales eléctricas virtuales).** A través del micro balance, las centrales virtuales pueden reemplazar a las centrales eléctricas de carga base y minimizar el uso de energías fósiles. El aumento del despacho de las plantas de generación distribuida agregadas es uno de los impactos principales.

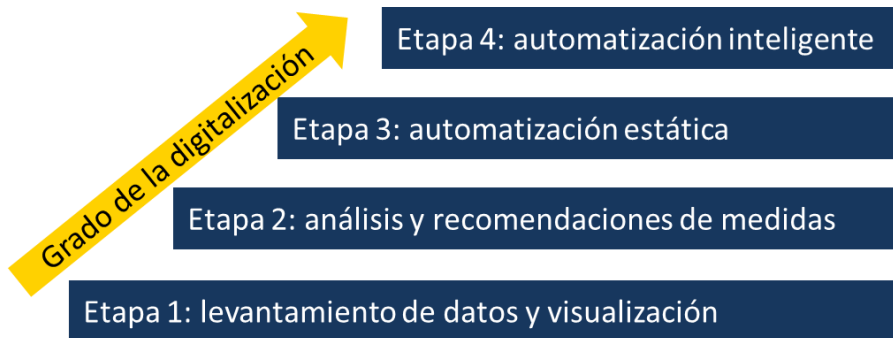
Bits y bytes para ahorros de CO₂

- **Negocio directo entre pares- Blockchain.** El impacto en las emisiones de GEI de la aplicación del blockchain en el sector energético no es aún cuantificable. No obstante, la aplicación del blockchain para la flexibilización del sistema y los mercados de energía, permitiría una mayor participación de energías renovables bajo nuevos esquemas de costo y transacción. Es importante tomar en cuenta que el consumo energético adicional del proceso y el desarrollo rápido de esta tecnología son factores que considerar.

Eficiencia energética

Bajar el consumo de energía en todos los sectores es fundamental para poder, a su vez, disminuir las emisiones de GEI asociadas y para lograr una descarbonización eficiente de la economía. Un desafío clave para los proyectos de eficiencia energética es la complejidad y la multitud de los casos y grados de soluciones existentes (ver figura abajo).

Grado de la digitalización actual de soluciones para la eficiencia energética



Fuente: Elaboración propia, con base en (Dena, 2017, pág. 9)

Algunas de las opciones digitales para aumentar la eficiencia energética en la industria, en el sector de la construcción y en las edificaciones identificadas, son:

- **Datos y automatización en la industria.** Basado en las diferentes estimaciones, se puede evaluar una disminución del consumo energético en la *industria por la aplicación de diferentes procesos digitales entre 10-40%*. En México, el potencial de mitigación asociado a la disminución del consumo energético en la industria puede insertarse en las estimaciones de la hoja de ruta para dicho sector.
- **Datos y automatización en el sector de la edificación.** En la fase de construcción de edificios, se puede disminuir el uso de materiales hasta un 30 por ciento, aplicando procesos de planificación digital (Petri et al., 2017, pág. 5). El uso de energía puede ser reducido durante la vida útil del edificio gracias a una modelación previa. Para la operación de edificios existentes, los sistemas de control automatizados pueden contribuir a un descenso del consumo de energía por los sistemas de iluminación y de aire acondicionado.

Consumo energético adicional por procesos digitales

Si bien, la cuantificación del estatus actual del consumo energético asociado a procesos TIC es compleja, lo es del mismo modo la proyección de dicho consumo. Un aumento en la eficiencia energética de la operación de centros de datos centralizados permitiría suponer que la demanda se mantendría estable en los próximos años. La Agencia Internacional de Energía (AIE) calcula una tasa compuesta de crecimiento anual de 0.5 por ciento, entre 2014 y 2020, para el uso energético de servidores (IEA, 2017,

Bits y bytes para ahorros de CO₂

pág. 105); para la transmisión de datos digitales, la AIE prevé una tasa compuesta de crecimiento anual del 9.6 por ciento, entre 2015 y 2021, conducido por la creciente demanda de los mercados de consumo privado - sobre todo para la transmisión de videos por internet. El consumo privado representa un 80 por ciento de la transmisión de datos (IEA, 2017, pág. 109).

El efecto cuestionable de la digitalización respecto al consumo energético es también observable en el consumo de energía en los hogares. Un estudio del Instituto Borderstep de Alemania reveló que las aplicaciones para hogares inteligentes, las llamadas *smart homes*, aumentan el consumo de energía eléctrica en 337 kWh/a, sin considerar los gastos de energía en el proceso de la producción y la transmisión de los datos y su procesamiento en los centros de datos (Borderstep, 2018).

Un uso adicional por los procesos digitales, que, principalmente, aumentan la eficiencia energética, debe considerar los posibles efectos en el consumo energético asociado al desarrollo tecnológico. Uno de ellos es el llamado efecto rebote, que, pese a que una mayor eficiencia debería conducir a un menor uso de la energía y emisiones, lleva a un consumo de energía creciente.

Conclusiones

- Los procesos de transformación digital en el sector energético tienen una correlación directa con el alcance de las metas climáticas. Para que la digitalización tenga un impacto positivo en las emisiones de GEI, se requieren intervenciones políticas y un marco regulatorio que destaque los aspectos positivos como la mejor integración de energías renovables y limite los impactos negativos como el aumento del consumo eléctrico.
- En el sector energético, tanto en México, como en Alemania, existe una gama de opciones que podrían aumentar la mitigación de GEI si se adoptan procesos digitales. Un eje fundamental es el aumento de la flexibilidad de este sector, a través de TICs que permiten la integración de proporciones mayores de energías renovables intermitentes, como la eólica y la solar.
- Existen también altos potenciales para la eficiencia energética: los avances en la tecnología de sensores y las capacidades de transportar y procesar datos permiten identificar malgastos de energía, optimizar y controlar sistemas complejos.
- Para el sector eléctrico, la experiencia alemana con la integración de las crecientes tasas de energías renovables intermitentes al sistema eléctrico puede dar una indicación de las soluciones digitales requeridas en cada etapa. Algunas de las experiencias destacadas son:
 1. Introducción de métodos avanzados de pronósticos de la generación eólica y fotovoltaica.
 2. Introducción del rol del agregador que provee un micro balanceo, a través de un portafolio de plantas de generación distribuida (centrales virtuales), por parte del ente regulador.
 3. Fomento a las inversiones en aplicaciones para redes inteligentes, incluyendo sistemas avanzados de medición para el monitoreo de las redes eléctricas.
 4. Despliegue de medidores inteligentes y otras disposiciones de gestión de carga que requieren de señales de precio para incentivar la flexibilización.
- El efecto de la digitalización para la mitigación de emisiones de GEI en México aún está por estimarse. La incorporación de procesos y tecnologías digitales en las actividades de generación y transmisión puede aumentar la flexibilidad del sistema para una mayor incorporación

Bits y bytes para ahorros de CO₂

de energías renovables a la red eléctrica, mientras que la eficiencia energética puede favorecer ahorros en el consumo y en emisiones.

- En México, la discusión sobre el potencial de mitigación asociado a procesos digitales precisa la construcción de un diálogo interinstitucional serio entre el sector climático y el energético. Asimismo, requiere generar instrumentos, modelaciones y estimaciones que permitan evaluar la contribución de estas acciones al cumplimiento de las metas climáticas de México.
- Un análisis sobre las medidas costo efectivas de digitalización y sus efectos y co-beneficios para el sector climático y energético orientado a su implementación, puede ser un primer paso para cubrir la brecha digital en el sector, al mismo tiempo que se reconocen sus beneficios sociales, ambientales y económicos.

Índice

Acrónimos y abreviaturas.....	3
Resumen Ejecutivo.....	4
Índice.....	10
Introducción.....	12
1. Contribución del sector energía a las emisiones de GEI en México.....	15
2. Redes inteligentes.....	21
2.1 Pronóstico de la generación renovable.....	22
2.2 Operación de las redes eléctricas.....	25
2.3 Flexibilización de la demanda eléctrica.....	28
3. Mercados inteligentes.....	33
3.1 Negocio a través de intermediarios de mercado.....	33
3.2 Negocio directo entre pares.....	36
4. Eficiencia energética.....	39
4.1 Datos y automatización en la industria.....	39
4.2 Datos y automatización en el sector de la edificación.....	41
5. Consumo energético adicional por procesos digitales.....	43
Conclusiones.....	47
Referencias.....	49

Índice de gráficas

Gráfica 1. Emisiones directas de gases de efecto invernadero (GEI) 2015 en México	17
Gráfica 2. Emisiones de gases de efecto invernadero del sector energía 2015 en México	17
Gráfica 3. Consumo final de electricidad por sector 2016	19
Gráfica 4. Ranking de los ámbitos del Programa de Redes Eléctricas Inteligentes por inversiones (miles de pesos)	27
Gráfica 5. Demanda de potencia en una red de distribución en un día típico, con procesos de carga no-gestionadas	31
Gráfica 6. Tráfico mundial de internet (GB por segundo).....	43
Gráfica 7. Consumo de energía por procesos digitales a nivel global (sin procesos de fabricación de equipos).....	43
Gráfica 8. Consumo de electricidad de centros de datos / servidores en TWh 2010-2030	44
Gráfica 9. El despliegue de las energías renovables en el sector eléctrico en Alemania y el rol de las soluciones digitales.....	48

Índice de figuras

Figura 1. Contexto del estudio.....	13
Figura 2. Ejemplo de pronóstico de generación en un parque eólico de México	24
Figura 3. Principio básico del Blockchain.....	26
Figura 4. Esquema de una central virtual de un agregador comercial	34
Figura 5. Ejemplo del principio de funcionamiento de una central virtual	35
Figura 6. El Landau Microgrid Project: blockchain para comercio directo de electricidad	38
Figura 7. Grado de la digitalización actual de soluciones para la eficiencia energética	39
Figura 8. Efecto de electrodomésticos conectados al consumo de electricidad anual en una vivienda.....	46

Índice de tablas

Tabla 1. Emisiones de gases de efecto invernadero 2015 en México.....	19
Tabla 2. Desarrollo de los volúmenes en el mercado spot en Alemania 2009 y 2016	33
Tabla 3. Agrupación de acciones de digitalización para redes inteligentes, mercados inteligentes y eficiencia energética en la generación y demanda de energía	42

Introducción

La digitalización de casi todos los sectores de la vida moderna es vista como una mega tendencia de la primera mitad del siglo XXI y en ocasiones, la “revolución digital” suele describirse como una tercera o cuarta revolución industrial. Dependiendo del ámbito, existen varias definiciones de la digitalización. Una primera búsqueda, arroja el siguiente concepto: “La digitalización es el uso de tecnologías digitales para cambiar un modelo de negocio y proporcionar nuevas oportunidades de ingresos y de producción de valor; es el proceso de pasar a un negocio digital.” (Gartner, 2018). Respecto al sector energético, la Agencia Internacional de Energía (AIE) define la digitalización como “la creciente aplicación de las tecnologías de información y comunicación (TIC) en la economía, incluidos los sistemas energéticos” (IEA, 2017, pág. 22). Dicha definición contempla tres elementos fundamentales:

Datos: aumento de los volúmenes de información digitalizada, gracias a la disminución de los costos de los sensores y del almacenamiento de datos.

Análisis: el uso de datos para producir información y conocimientos útiles impulsado por el rápido progreso de las capacidades informáticas y analíticas avanzadas.

Conectividad: intercambio de datos entre personas, dispositivos y máquinas (incluyendo máquina a máquina), a través de redes de comunicación digitales cada vez más rápidas y baratas.

En los años recientes, México ha impulsado un proceso de transición energética que consiste, esencialmente, en una descarbonización de la generación de energía eléctrica y de los usos finales de la misma, mediante una mayor participación de energías renovables en la matriz de generación y una reducción de la intensidad energética, a través de acciones por la eficiencia energética, entre otras. Dicha transición está fundamentada en la Ley de Transición Energética (2015), cuyo objeto es regular el aprovechamiento sustentable de la energía, así como las obligaciones en materia de energías limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la industria eléctrica, manteniendo la competitividad de los sectores productivos (LET, Art. 1). Una de las principales razones de dicha transición energética es la reducción de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) de la industria eléctrica que, como parte del sector energético, constituye la primera fuente de emisiones de GEI en México (INECC, 2018b).

La transición energética puede verse impulsada por la incorporación de mejoras tecnológicas en distintas fases de la cadena de valor del sector eléctrico que le proporcionan mayor eficiencia y que disminuyen las emisiones de GEI asociadas, tales como: mejoras en los materiales utilizados para transmitir la electricidad, desarrollo de nuevas tecnologías de combustión o aún más relevante de nuevas fuentes renovables de generación. En ese ámbito de las mejoras tecnológicas, la digitalización, o sea la creciente aplicación de tecnologías de información y comunicación, puede también tener un aporte importante en la descarbonización del sector energético. La digitalización implica una interrelación con el sector energético en dos sentidos. Por un lado, los procesos digitales apoyan a la mejor integración de las energías renovables y al aumento de la eficiencia energética. Por el otro, pueden implicar consumos adicionales de energía, derivados de los propios procesos digitales.

A partir de lo anterior, el objetivo de este estudio es analizar las relaciones entre la digitalización y la emisión de GEI en el sector energético, con énfasis en el subsector eléctrico. Se pretende identificar los ámbitos donde el uso de procesos digitales puede contribuir a la mitigación de GEI, analizando el estado de la discusión en Alemania y la situación en México. Por otra parte, el estudio pretende contribuir a la definición de acciones políticas para el buen uso de la digitalización como herramienta del régimen de mitigación del cambio climático en México. Con este fin, el presente informe intenta identificar y priorizar las áreas en las cuales pueda contribuir a la mitigación de GEI, así como a una

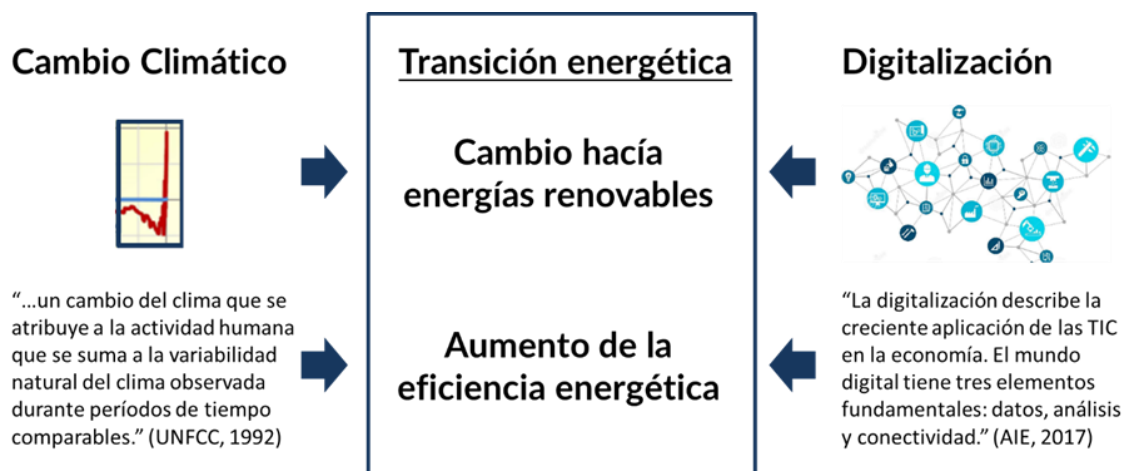
Bits y bytes para ahorros de CO₂

mayor aplicación de procesos digitales a corto y mediano plazo, al mismo tiempo que se inscribe en la transición energética hacia las energías renovables y la eficiencia energética (Figura 1).

El enfoque de este informe orientador está centrado en el sector eléctrico y en la eficiencia energética, por la alta relevancia de estos ámbitos para la mitigación de GEI y por el amplio espectro de soluciones digitales disponibles. Otro sector relevante con alto potencial para la mitigación de GEI, a partir de procesos digitales, es el transporte, el cual solo será abordado en relación con la integración de los vehículos eléctricos a las redes eléctricas.

Por lo anterior, el estudio analiza tres áreas de acción específicas para lograr su objetivo: redes inteligentes, mercados inteligentes y eficiencia energética. Las redes inteligentes están asociadas a la transmisión y distribución de la energía eléctrica, así como a una fase crucial para una mayor incorporación y despacho de energías renovables a la red, ya sea de proyectos de gran y mediana escala, o de generación distribuida. En el ámbito de mercados inteligentes, se analizan las condiciones económicas y de modelos de negocio, que permitan una mayor participación de energías renovables o de acciones de eficiencia energética. Un ejemplo de ello son los esquemas de agregación de cargas. En el área de la eficiencia energética, se analizan las mejoras en la reducción del consumo final de energía en los sectores en donde hay un mayor consumo eléctrico.

Figura 1. Contexto del estudio



Fuente: Elaboración propia

Con base en el análisis de las emisiones de GEI de México (vea capítulo 2), este estudio se enfoca en analizar acciones que podrían detonar el potencial de mitigación de GEI, a través de procesos digitales en los siguientes sectores específicos:

- industria eléctrica (redes inteligentes y mercados inteligentes)
- industrias manufactureras y de construcción (eficiencia energética)

El sector de la edificación (instalaciones comerciales y edificios públicos), también será analizado en este estudio, debido al alto grado de aplicabilidad de procesos digitales y al elevado consumo de energía eléctrica derivado, a su vez, de estos. Para el sector residencial, un breve análisis (vea capítulo 5) revela que procesos digitales en el marco de las casas inteligentes ("smart home appliances") tienen la tendencia de aumentar el consumo eléctrico. Además, el consumo residencial es con menor relevancia al respecto de la mitigación de GEI. Antes de dichas consideraciones, no se da mayor relevancia al análisis de este sector en el marco de este estudio.

En el capítulo uno se describe brevemente la relevancia y los ámbitos destacados del cambio climático y de las emisiones sectoriales de México, para luego, en los siguientes tres capítulos, presentar un

Bits y bytes para ahorros de CO₂

análisis de las aplicaciones digitales para la integración técnica de las energías renovables (redes inteligentes), la integración económica de dichas fuentes de energía (mercados inteligentes), y un panorama del potencial de procesos digitales para aumentar la eficiencia energética. En el capítulo cinco se hace una revisión del consumo de energía adicional en el que estos sectores incurren al implementar procesos digitales. Finalmente, se presenta un capítulo con las conclusiones, el cual reúne los principales hallazgos y recomendaciones derivadas de este análisis.

Cabe destacar que este informe orientador no pretende ser exhaustivo ni brindar respuestas a todas las interrogantes sobre el tema, ya que los efectos del cambio climático y de la digitalización en el desarrollo de las sociedades son complejos, interdependientes y variables. Después de veinte años de investigación científica, todavía persiste una incertidumbre sobre la magnitud de los impactos energéticos y ambientales de las tecnologías de información y comunicación (Horner et al., 2016, pág. 15).

El presente informe recoge discusiones generadas a partir de un viaje de estudios a Alemania, organizado por el proyecto “Convergencia de la Política Energética y de Cambio Climático” (CONECC), en septiembre de 2018, que contó con la participación de distintos representantes del sector público, privado, social y académico de México, que trabajan sobre temas de digitalización del sector eléctrico para la protección climática. En dicho viaje se introdujo la experiencia alemana en materia de digitalización, incluyendo experiencias técnicas, regulatorias y visiones varias de dicho proceso, para ser contrastadas con la experiencia mexicana.

En octubre de 2018, el proyecto CONECC, en colaboración con la Secretaría de Energía (SENER) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), organizó el Foro Internacional “Digitalización del sector energía: ¿una oportunidad para la protección climática?”, en el cual se discutieron las perspectivas mexicanas en la materia. Este informe orientador pretende contribuir a dichas discusiones, y dotar de elementos y experiencias técnicas en torno a los procesos digitales, que podrían ser implementados en México para dichos fines.

1. Contribución del sector energía a las emisiones de GEI en México

“El cambio climático se atribuye directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (UNFCCC, 1992).

De acuerdo con el reporte especial de calentamiento global a 1.5°C presentado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC), la media de temperatura observada en la superficie terrestre para la década 2006-2015, fue 0.87°C más alta -entre el rango de 0.75°C y 0.99°C- que el promedio del periodo 1850-1900, estimando que, actualmente, el cambio climático con origen antropogénico está incrementando de manera rápida (IPCC, 2018).

La acción climática en los sectores que representan los volúmenes de emisión más grandes se vuelve urgente para mitigar los efectos del cambio climático. El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), identificó varios riesgos que enfrentará México, entre los más destacados: un aumento en la intensidad de las tormentas y situaciones de clima severo, peligros para las zonas costeras y una disminución en la productividad del maíz (INECC, 2018a).

Ante tal urgencia, la comunidad internacional ha acordado, en el marco del Acuerdo de París (2015), reducir sus niveles de emisiones a través de Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC, por sus siglas en inglés) estableciendo metas nacionales que, en la medida de sus recursos y capacidades, contribuyan de manera condicionada y/o no condicionada a no sobrepasar el aumento de la temperatura media global, por encima de los 2°C, centrandos sus esfuerzos en limitar dicho aumento a sólo 1.5°C.

México fue el primer país en desarrollo en presentar su NDC a nivel nacional ante la CMNUCC. El gobierno federal construyó la NDC con base en la actualización del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero de 2013 (Gobierno de México, 2016), mismo que fue actualizado en 2018, para presentar datos del 2015. Según los compromisos de mitigación para el periodo 2020-2030, el país realizará acciones de mitigación que tengan como resultado la reducción del 22 por ciento de sus emisiones de GEI al año 2030, lo cual significa una reducción de alrededor de 210 megatoneladas (Mt) de CO₂e, en comparación con la línea base. Con este compromiso de mitigación climática, se estima que México tendrá un pico máximo de emisiones alrededor del año 2026 y logrará bajar la intensidad de carbono del PIB en 40 por ciento (INECC, 2018). Además, dicha meta fue incluida en la revisión de la Ley General de Cambio Climático (LGCC) del 2018, estableciendo metas sectoriales de mitigación de emisiones.

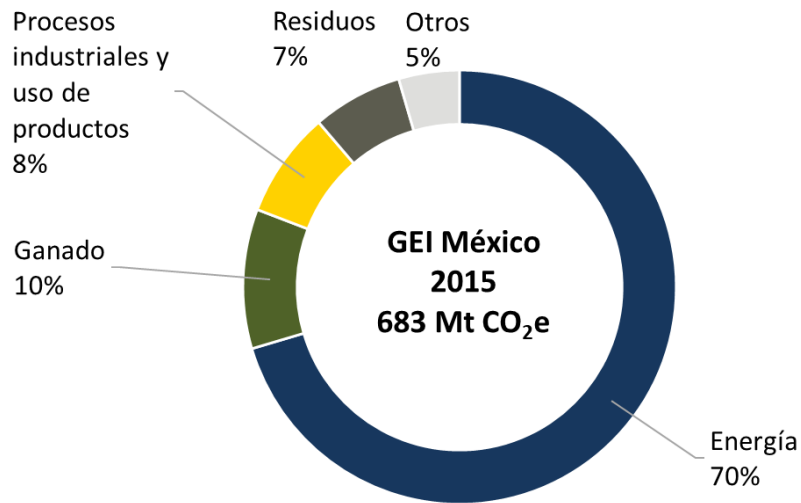
El sector energético es uno de los sectores con más emisiones de GEI en la atmósfera. En México, alrededor del 70 por ciento de las emisiones de GEI del año 2015, se encuentran asociadas al sector energía, incluyendo la generación de energía eléctrica, la extracción y combustión de fósiles y el transporte o las emisiones fugitivas, como muestran las

Bits y bytes para ahorros de CO₂

Gráfica 1 y Gráfica 2 (INECC, 2018b). La LGCC establece en su artículo segundo transitorio, la necesidad de un compromiso de los sectores (transporte, generación eléctrica, residencial y comercial, petróleo y gas e industria) de reducir en 18, 31, 18, 14 y 5 por ciento sus emisiones, respectivamente, para alcanzar las metas nacionales de mitigación.

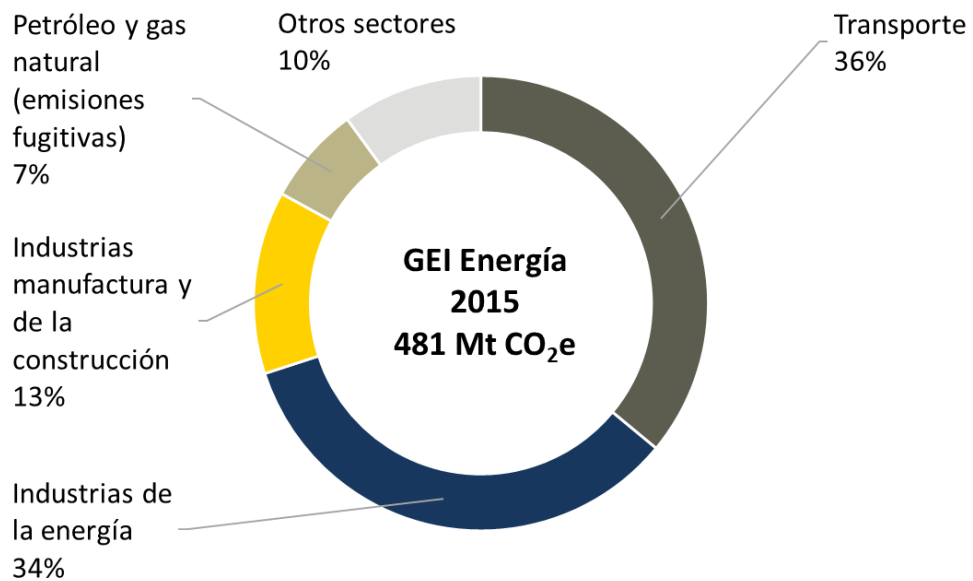
Bits y bytes para ahorros de CO₂

Gráfica 1. Emisiones directas de gases de efecto invernadero (GEI) 2015 en México



Fuente: Elaboración propia, basada en (INECC, 2018b, pág. 5)

Gráfica 2. Emisiones de gases de efecto invernadero del sector energía 2015 en México



Fuente: Elaboración propia, basada en (INECC, 2018b, pág. 11)

Este primer acercamiento a las emisiones de GEI en México, indica que los subsectores de generación de energía eléctrica, el consumo energético de la industria y el transporte, son los más importantes campos de acción para la mitigación. De acuerdo con la

Bits y bytes para ahorros de CO₂

Tabla **1**, la contribución porcentual de dichos sectores a las emisiones nacionales refrenda lo anterior.

Bits y bytes para ahorros de CO₂

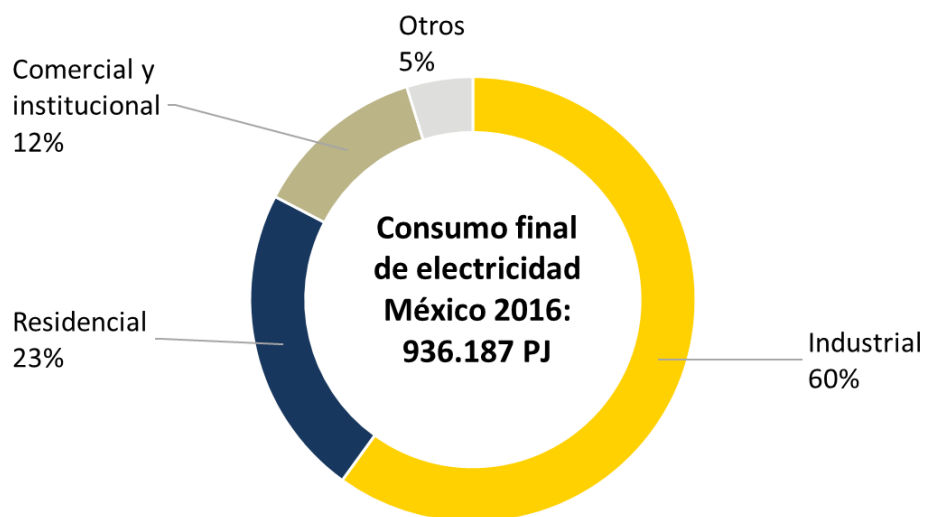
Tabla 1. Emisiones de gases de efecto invernadero 2015 en México

Sector	%	MtCO ₂ e
Transporte	25%	171
Industrias de la energía (incl. generación eléctrica)	24%	165
Industrias de manufactura y de la construcción y procesos industriales y uso de productos (IPPU)	17%	118
Ganado	10%	71
Residuos	7%	46
Emisiones fugitivas	6%	44
Fuentes agregadas y fuentes de emisión no CO ₂ de la tierra	5%	31
Otros sectores (incl. comercial y residencial)	5%	37
TOTAL		683

Fuente: Elaboración propia, basada en (INECC, 2018b)

Además de las emisiones asociadas al sector energía, otro aspecto relevante es el análisis sobre los sectores que cuentan con mayores emisiones asociadas al consumo final de electricidad. Una revisión de los datos del consumo final de la energía generada por las empresas eléctricas revela el rol destacado de la industria, que consume 60 por ciento de la electricidad. Esto es equivalente a un 14 por ciento de las emisiones totales de México. En comparación, el sector residencial tiene un aporte al consumo de electricidad de 23 por ciento, mientras que el sector comercial y público, del 12 por ciento (Gráfica 3).

Gráfica 3. Consumo final de electricidad por sector 2016



Fuente: Elaboración propia, basada en (SENER-SIE, 2016)

Ante dicho escenario, México se ha planteado metas para alcanzar una mayor participación de energías limpias (definición que incluye a las energías renovables, de acuerdo a la Ley de la Industria Eléctrica de México, decretada en 2014) en la matriz de generación de energía eléctrica, y también ha propuesto, por primera ocasión, metas de reducción de la intensidad energética, mediante la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más limpios, implementables a través del Programa Especial de la Transición Energética (PETE). De acuerdo con el primer Reporte Anual del

Bits y bytes para ahorros de CO₂

Potencial de Mitigación de Gases de Efecto Invernadero en el Sector Eléctrico (SENER, 2018), las proyecciones de capacidad instalada correspondientes a las metas de energías limpias del sector cumplen con la meta no condicionada establecida en la NDC, de acuerdo al Programa Indicativo para la Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas (PIIRCE), contenido en el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2017-2031).

Entre los principales desafíos para un mayor despliegue de capacidad renovable del país, y en consecuencia de una mayor mitigación de emisiones proveniente del sector energía, se ha identificado la oportunidad de tomar ventaja del proceso de digitalización del sector eléctrico. La incorporación de energías renovables a la red y un aumento en su despacho, depende de muchos factores técnicos y de flexibilidad de la red, que podrían encontrar en la digitalización soluciones, tales como la mejora de los pronósticos de demanda y sus consecuentes mejoras en la transmisión y distribución; la agregación de sistemas de generación distribuida; un arreglo de actores distintos que habiliten mercados energéticos fuera de la red o bajo esquemas de red inteligente, o una mejora en la gestión de la demanda de la energía eléctrica y su uso final, a partir de mejoras tecnológicas y de sistemas.

La digitalización del sector eléctrico habilita la acción climática en cuanto favorece una mayor penetración de las energías renovables y la eficiencia energética en el sistema eléctrico, y crea nuevos esquemas de producción y consumo de la energía. Por ejemplo, una gran parte de la descarbonización del sector transporte, está vinculada a su acoplamiento con el sector eléctrico, a través de la movilidad eléctrica con motores de baterías de litio o hidrógeno, y los procesos digitales pueden tener un rol importante en la electrificación del sector transporte, por aplicaciones de carga inteligente para la integración de los vehículos eléctricos a las redes inteligentes (véase capítulo 2.3).

Este informe se enfoca en la mitigación, tanto en el sector eléctrico, como en el industrial. Cabe destacar que, a pesar de que la contribución de las edificaciones de los sectores residencial, comercial y público a las emisiones del país no es muy alta (apenas 4 por ciento de las emisiones totales), tiene mucha relevancia para la interfaz entre la digitalización y el sector energético. Se revisarán medidas para disminuir el consumo energético en edificios y los posibles aumentos del consumo de energía por aplicaciones en casas inteligentes (véase el capítulo 5).

2. Redes inteligentes

En el discurso técnico en muchos países, el término redes inteligentes (*Smart Grids*) se usa como sinónimo de las nuevas opciones técnicas impulsadas por procesos digitales en el sector eléctrico. En las redes inteligentes se generan y analizan datos de todos los equipos a lo largo de la cadena de valor (de la generación a la demanda). Estas unidades se conectan con enlaces de comunicación y se controlan con capacidades de procesamiento de la nueva multitud de información. En otras palabras, por “redes inteligentes” se entiende la combinación y acoplamiento de las redes eléctricas con la red informática y de comunicaciones, para que el sistema opere proporcionando información en tiempo real y de manera permanente desde todos los puntos (González, 2017). Suministrar de mayor inteligencia a las redes es fundamental para hacer que los sistemas eléctricos sean más flexibles al integrar tasas crecientes de energías renovables que provocan los cambios fundamentales en el funcionamiento del sistema eléctrico, entre los que destacan los siguientes:

- *Reducción de los costos de las energías renovables*

Aparte de ser tecnologías con bajas emisiones de GEI por energía generada durante su ciclo de vida y no dependientes del uso de recursos naturales limitados, las energías renovables son competitivos con la generación a través de fuentes fósiles. Para dar un ejemplo, los resultados de la subasta a largo plazo de 2017 de la SENER implicaron un precio promedio de 20.57 USD por MWh de las energías renovables (eólica y FV); uno de los precios más bajos del mundo (SENER, 2017a). Debido a estos costos, se espera que dichas tecnologías estén en el centro de la transición energética.

- *Generación intermitente*

El auge de las energías renovables no-convencionales lleva a un aumento de la complejidad de operación del sistema eléctrico. Esto por la fluctuación de la generación que depende de las condiciones meteorológicas, viento e irradiación solar. Sistemas integrados de pronósticos de generación eólica y fotovoltaica, basados en procesos digitales, permiten minimizar la incertidumbre para el operador del sistema (véase capítulo 2.1).

- *Descentralización del sistema eléctrico*

La complejidad de operación del sistema eléctrico aumenta también por la introducción de una multitud de actores en los mercados eléctricos. En el sistema eléctrico antiguo existían centenas de plantas de generación, y éste estaba diseñado para transportar la energía por las redes de transmisión y distribución a los consumidores finales. Con la introducción masiva de la generación distribuida y, más recientemente, de sistemas de almacenamiento, el escenario se hace más complejo. El operador del sistema tiene que integrar generadores de diferentes tamaños y con niveles de tensión distintos a las redes eléctricas. Además, nuevos actores se desarrollan en el mercado como los “prosumidores” que algunas veces son consumidores de energía de la red, y otras, son proveedores de excedentes de energía generada por su planta de autoconsumo.

Se presentan a continuación algunas soluciones digitales, como el pronóstico de la generación de energías renovables, la operación y mantenimiento automatizado de las redes, y la gestión de carga (flexibilización de la demanda eléctrica), como medidas orientadoras para una mayor integración de las energías renovables a las redes eléctricas a lo largo de la cadena de valor.

2.1 Pronóstico de la generación renovable

Uno de los mayores desafíos de la generación eólica y fotovoltaica es su intermitencia, asociada a las condiciones meteorológicas. La operación de un sistema eléctrico con alta participación de estas fuentes requiere predicciones precisas sobre su generación y la inyección esperada de energía eléctrica. La información sobre la futura generación de energía solar y eólica es sumamente importante para la seguridad del sistema, y también para aprovechar al máximo la capacidad instalada de energías renovables.

Si se cuenta con un grado de certeza sobre la producción eólica y fotovoltaica, se requiere menos incorporación de generación proveniente de plantas de energía eléctrica creada a base de combustibles fósiles. Las plantas flexibles cubren la diferencia entre la demanda de electricidad y la generación renovable para garantizar un reajuste continuo. Sin embargo, las plantas fósiles necesitan horas de anticipación para aumentar o bajar su generación de electricidad de manera sustantiva. Dado que la flexibilidad de la operación de centrales fósiles es limitada, el operador del sistema requiere pronósticos fiables para poder elaborar un plan operativo con un día de anticipación.

En la zona del operador del sistema eléctrico en el noreste de Alemania *50 Hertz*, la precisión del pronóstico de viento ha alcanzado el 96-98 por ciento de exactitud, y la precisión del pronóstico solar ha alcanzado un nivel de exactitud de 93-95 por ciento, excluyendo las horas nocturnas (50 Hertz, 2016, pág. 25; 29). Esta exactitud es clave para la operación de un sistema como el de *50 Hertz*, el cual en el año 2017 contó con un aporte de energías renovables del 53% por ciento, de las cuales más del 90 por ciento provenían de energía eólica y fotovoltaica (50 Hertz, 2018). El operador procesa los pronósticos de las empresas *Enercast*, *EnergyWeather*, *Meteocontrol*, *Meteorologica* y *Energy&Meteo* con una ponderación interna, por la exactitud de las predicciones históricas de cada una de las empresas. Las bases actuales de este sistema fueron elaboradas entre los años 2004-2006, cuando Alemania contaba, en su matriz eléctrica, con tasas de energías renovables intermitentes de alrededor del 10 por ciento.

El impacto de la intermitencia y del potencial de pronósticos para México fue investigado a través de un proyecto piloto entre el CENACE y la empresa alemana *Energy&Meteo*, proyecto que fue cofinanciado por la cooperación Alemana GIZ. Para este proyecto, se instaló un sistema de pronósticos en 17 parques eólicos (con una capacidad instalada de 1,900 MW en total) y en ocho parques fotovoltaicos (501 MW de capacidad instalada) de México. Los resultados ilustran la variación de la generación eléctrica entre diferentes días, pero también las fluctuaciones diarias. La

Bits y bytes para ahorros de CO₂

Figura 2 indica la predicción y la generación actual de un parque eólico específico en México, por un plazo de tres días, ilustrando también un fuerte auge en algunas horas debido a las condiciones de viento en el Istmo de Tehuantepec. En dicha figura es posible observar, además, el nivel de exactitud de la prognosis y también la variación.

Bits y bytes para ahorros de CO₂

Figura 2. Ejemplo de pronóstico de generación en un parque eólico de México



Fuente: Energy&Meteo Systems, presentación interna.

La elaboración de estos pronósticos requiere el levantamiento de una multitud de datos, entre ellos:

- Datos meteorológicos de diferentes proveedores de modelos numéricos de predicción meteorológica, por ejemplo, de los centros meteorológicos nacionales
- Datos reales de capacidad y de producción de las plantas de energías renovables intermitentes
- Información del operador de la red eléctrica y del operador de la planta sobre las actividades de mantenimiento u otras razones por un posible recorte de la inyección de energía (GIZ, 2015, pág. 16ff).

El análisis para transformar datos meteorológicos en una predicción de producción de energía eléctrica incluye:

- Predicción con base en la calibración entre los datos meteorológicos, con los datos de generación de energía, aplicando metodologías de inteligencia artificial (enfoque estadístico).
- Refinamiento espacial horizontal de los datos meteorológicos, con base en perfiles de viento verticales para poder pronosticar la velocidad del viento a la altura del cubo de las plantas individuales (enfoque físico).
- Ponderación flexible de los diferentes datos meteorológicos, según su exactitud para pronosticar diferentes eventos (como vientos fuertes, situaciones de presión alta o neblina matutina) (GIZ, 2015, pág. 17ff).

Beneficios potenciales

La aplicación de sistemas eficientes de pronósticos de generación de las energías renovables variables es una de las bases para su integración al sistema eléctrico. La aplicación de un sistema eficiente de pronósticos es una precondition para poder aumentar la contribución de tecnologías renovables con bajas emisiones de GEI al sistema eléctrico, a tasas mayores de 10 por ciento.

2.2 Operación de las redes eléctricas

La operación de un sistema eléctrico con alta participación de generación distribuida requiere de datos detallados y un buen control de las plantas de generación. A nivel de las redes eléctricas también, se requiere mayor información sobre el estado y los procesos de operación automatizada. Estas soluciones digitales abren nuevas opciones para gestionar las redes.

a. Comunicación con plantas de generación distribuida

En casi todas las plantas de generación eléctrica, se levanta y analiza una multitud de datos sobre el estado actual de las mismas, por ejemplo, los datos de rendimiento, la potencia, la velocidad del viento o la irradiación solar, entre otras variables. En plantas con una capacidad mayor de 1 MW, esta información es analizada a través de Sistemas de Control de Supervisión y Adquisición de Datos (*Supervisory Control And Data Acquisition – SCADA*). Estos sistemas sirven también como interfaz entre el operador de la planta y de la red eléctrica, así como del proveedor de pronósticos. Los datos son accesibles a través de un registrador de datos u otras interfaces de comunicación, transmitidos por *Ethernet*. Los proveedores de equipos de generación eléctrica normalmente ofrecen también unidades de control remoto acorde a las especificaciones del operador de la red local, mismo que determina los requerimientos técnicos para el intercambio de información (Enercon, 2016).

Para el control de sistemas de generación, el sistema convencional o mejor dicho no-digital es el control de onda o de frecuencia sonora. Esta tecnología permite una gestión de las plantas de generación, p.ej. limitar o cortar la inyección de energía a la red según la demanda de energía. La desventaja es que, en dichos sistemas, el flujo de información solo es unidireccional, es decir, del operador a todos los generadores que comparten la misma frecuencia de la comunicación de onda. En Alemania, las plantas de generación eléctrica a partir de una potencia de 30 kW cuentan con estos receptores para poder recibir señales por parte del operador del sistema. En comparación a este sistema convencional, medidores inteligentes permiten una comunicación bidireccional, poniendo a disposición en tiempo real informaciones actuales de la planta de generación. Un dispositivo transfiere estos datos al operador de la red y los comercializadores de energía. A través de cajas de control, las intervenciones del operador pueden ser facilitadas de manera gradual, como la inyección a la red de energía de una planta de generación, o para la gestión de la demanda. En México, la instalación a gran escala de medidores inteligentes se enfoca hasta hoy en usuarios finales de energía eléctrica.

b. Medición y operación automatizada de las redes

Otra área importante para aumentar la disponibilidad de información para el operador en las redes eléctricas es la instalación de sensores y sistemas de análisis. Los sensores digitales tienen la capacidad de proporcionar información sobre el estatus de las redes eléctricas en varios lugares -como la temperatura, el voltaje y la corriente- de manera continua y en tiempo real. La adopción de la operación de las redes de transmisión por un sistema de monitoreo que considera también las temperaturas medioambientales y las predicciones de clima y su impacto en la capacidad de transmisión, son medidas importantes para optimizar el uso de la infraestructura existente (Agora, 2017).

Estas medidas aumentan la cantidad de datos de manera sustantiva y, resultado de ello, el requerimiento de capacidades para analizarlas. Los sistemas de análisis de la red realizan cálculos anticipados de la seguridad del equipo, basados en modelos o gemelos digitales modelados, en medidas automatizadas de gestión de la congestión y también en la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático. El mantenimiento predictivo con algoritmos de autoaprendizaje tiene como objetivo solucionar un problema potencial antes de que empeore, cause daños colaterales o provoque tiempos de inactividad. Modelos del funcionamiento del equipo, basados en datos históricos, apoyados por dispositivos y sensores cada vez más conectados, ayudan a supervisar y predecir las necesidades

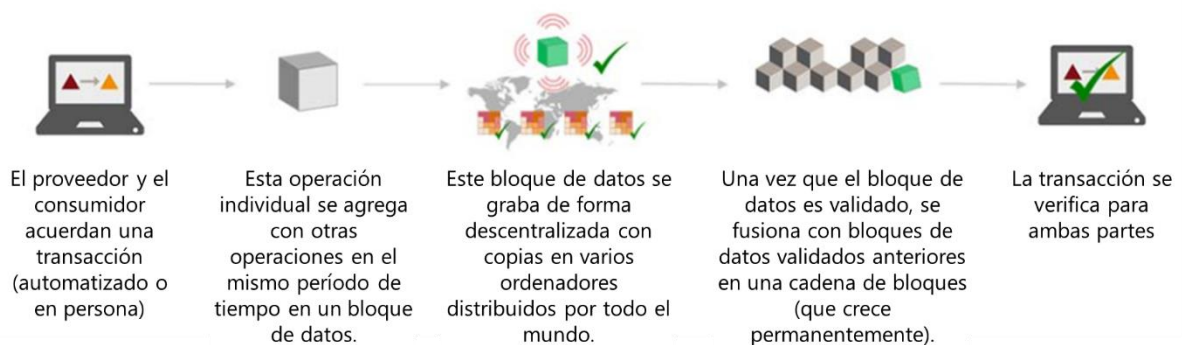
Bits y bytes para ahorros de CO₂

de operación y mantenimiento. Estos sistemas de mantenimiento predictivo permiten bajar la frecuencia de interrupciones de servicios y reducir los costos de mantenimiento (BNEF, 2017, pág. 18) (IEA, 2017, pág. 79f). Según un análisis de *Google Deepmind*, una empresa especializada en la inteligencia artificial, los algoritmos de aprendizaje automático pueden aumentar la capacidad de la red eléctrica existente en Reino Unido, en un 10 por ciento (BNEF, 2017, pág. 34).

La empresa estadounidense GE estima un aumento de la capacidad de transporte de energía eléctrica de por lo menos 20 por ciento, debido al amplio rango de aplicaciones digitales disponibles para la operación y mantenimiento de las redes (GE, 2016, pág. 6). La AIE estima que una digitalización avanzada conduce a menores pérdidas en la red (de 5 por ciento). Otros efectos positivos son la extensión de 5 años de la vida útil de la infraestructura y costos de operación y mantenimiento disminuidos en un 5 por ciento (IEA, 2017, pág. 78). Muchos proveedores se especializaron en la provisión de software y soluciones completas para optimizar la operación de las redes en áreas con alta penetración renovable, p.ej. las empresas Kiwigrid, Envelio y Venios. Las plataformas digitales de estos proveedores en combinación con sistemas de medición y monitoreo aumentan la transparencia sobre el estatus de las redes y permiten una planificación y administración automatizada.

Un ejemplo de un proyecto piloto innovador para la operación de las redes eléctricas apoyado por algoritmos blockchain (cadena de bloques), está siendo elaborado por Tennet, uno de los cuatro operadores del sistema troncal alemán, junto con la empresa IBM y el proveedor de baterías solares para el hogar, Sonnen. En el marco del proyecto, se conectaron unas 6,000 baterías solares de un tamaño menor a 10 kWh. La gestión de la carga de las baterías se adapta a la situación actual en la red eléctrica, siguiendo las señales del operador del sistema (en este caso, Tennet). La tecnología blockchain para la gestión y la facturación permite la comunicación masiva y paralela entre todos los diferentes actores involucrados, incluyendo los miles de sistemas de almacenamiento distribuidos en diferentes lugares. La Blockchain optimiza los procesos de facturación de energía entre estos actores, como todas las transacciones son documentadas de manera distribuida y no por una entidad centralizada. Por esto, no se puede revertir ni manipular retrospectivamente los registros, ya que todas las transacciones se guardan en varios computadores. Esto lo hace difícil, manipular registros en una Blockchain.

Figura 3. Principio básico del Blockchain



Fuente: (PWC, 2016, pág. 4)

Según las empresas involucradas en el piloto, la ventaja de la aplicación de Blockchain para la integración de nuevos equipos de generación y almacenamiento distribuida a la red eléctrica es que el procesamiento de la información es optimizado, cumpliendo con los requerimientos de seguridad y exactitud del operador del sistema troncal. La aplicación de la tecnología blockchain permite un uso

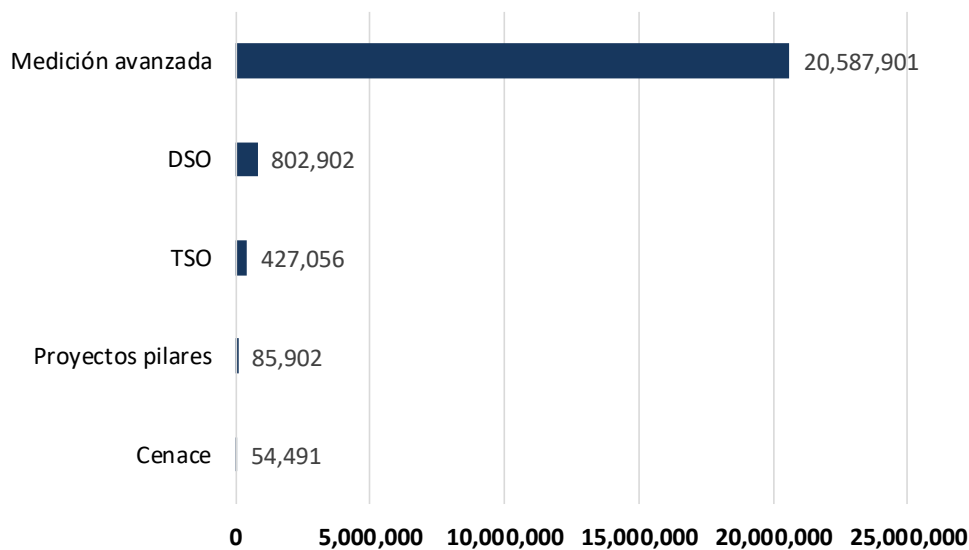
Bits y bytes para ahorros de CO₂

optimizado de la red eléctrica, resultando en menos recortes de parques eólicos y otras medidas de estabilización de la red eléctrica, como el “re-despacho” (Tennet, 2017).

En México, el Programa de Redes Eléctricas Inteligentes (PREI) incluye varias medidas para automatizar la operación de las redes de transmisión y de la distribución (Ver Anexo sobre el Programa de Redes Eléctricas Inteligentes). La Comisión Reguladora de Energía (CRE) de México inició el proyecto “Mapa de Ruta Regulatorio de la Red Eléctrica Inteligente en México” en 2012, cuyo reporte final fue publicado en septiembre de 2014. Como siguiente paso, se realizó una evaluación del estado actual de las instalaciones en materia de redes inteligentes en el país, y se identificaron los proyectos a ser desarrollados a través del Programa de Redes Eléctricas Inteligentes, que fue publicado por la SENER en septiembre de 2017 (SENER, 2017b, pág. 14).

El PREI tiene como objetivo identificar las áreas de oportunidad en donde se podrían aplicar tecnologías que generen información en tiempo real y de manera permanente desde todos los puntos, en las redes eléctricas. El enfoque es la incorporación gradual de los usuarios finales, a través de una modernización de la medición con medidores inteligentes. Otros proyectos incluyen la automatización de la operación de las redes de distribución (DSO) y de transmisión (TSO), proyectos estratégicos, como la arquitectura y estrategia empresarial de ciberseguridad de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), y proyectos a nivel empresarial de CENACE. La Gráfica 4 muestra la distribución de las inversiones para los proyectos considerados por ámbito y por proyecto.

Gráfica 4. Ranking de los ámbitos del Programa de Redes Eléctricas Inteligentes por inversiones (miles de pesos)



Fuente: Elaboración propia, basada en (SENER, 2017b).

La introducción de medidores inteligentes en el PREI es congruente con las actividades en otros países hacia la digitalización del sector eléctrico, por ejemplo, los casos de Italia y Alemania.

Beneficios potenciales

La incorporación de procesos digitales en las redes de transmisión y distribución favorece un control más inteligente del despacho de energías renovables, evitando congestiones y aprovechando la generación de energías renovables en tiempo real.

2.3 Flexibilización de la demanda eléctrica

En el sector eléctrico, la gestión de la demanda es uno de los factores relevantes para flexibilizar el sistema, según los requerimientos de la inyección fluctuante de energías renovables. Los sistemas digitales permiten reducir los costos de transacción entre proveedores y consumidores de electricidad, así como para los operadores de las redes (IEA, 2017, pág. 41). Sin embargo, los potenciales para una flexibilización de la demanda eléctrica se distinguen por el tipo de uso de la electricidad y el sector. A continuación, se detallará el uso de medidores inteligentes en el sector residencial (a), y el potencial de la flexibilización de la demanda en el sector industrial (b) y en la movilidad eléctrica, como nuevo usuario del sistema eléctrico (c).

a. Medidores inteligentes en el sector residencial

Muchas discusiones sobre las redes inteligentes y la distribución de presupuestos se concentran en la implementación masiva de medidores inteligentes. Muchas veces estos son considerados como el corazón de un nuevo sistema de medición que incluye puentes de comunicación entre generadores y consumidores. El propósito de los medidores inteligentes es aumentar la funcionalidad operativa de todas las unidades en una red eléctrica, a través de puentes de comunicación que transfieren estos datos al operador de la red y los comercializadores de energía. Las funciones principales de los medidores inteligentes y los puentes de comunicación en las redes inteligentes son:

1. *Recibir información sobre el estatus de las plantas de generación distribuida y de la carga de los consumidores de electricidad, incluyendo una disminución de las pérdidas no técnicas causado por el retiro ilegal de energía, lo cual es considerada como una de las razones principales para la instalación de medidores inteligentes, como estos permiten detectar cargas ilegales en tiempo real.*
2. *Flexibilizar el sistema eléctrico.* Controlar la inyección de energía de plantas pequeñas y permitir un control de la demanda por señales de precio, según el suministro de energías renovables.
3. *Aumentar la eficiencia energética.* La desagregación de datos da transparencia sobre el consumo energético al consumidor final, y permite ahorros de alrededor del 10 al 15 por ciento del consumo de energía eléctrica en el hogar, por la visualización del consumo.
4. *Facilitar nuevos modelos de negocio.* La introducción de nuevos modelos de negocio para prosumidores, sistemas de batería, cargas flexibles, etc., requiere sistemas de medición avanzados que permitan una facturación de los flujos de energía bidireccionales.

La gran desventaja de la puesta en marcha de los medidores inteligentes de manera masiva son los costos asociados. En Alemania un medidor inteligente cuesta alrededor de entre 70 y 100 Euros, comparable a un sistema de control de onda convencional. Sin embargo, para el levantamiento, la transmisión y el análisis de la alta cantidad de datos, la operación del medidor inteligente cuesta más de 60 Euros por hogar por año en Alemania (ComMetering, 2018). Debido a estos altos costos, el valor agregado de los medidores inteligentes es cuestionable.

La recuperación de la inversión en un medidor inteligente es casi imposible para el sector residencial que no cuenta con una planta de generación eléctrica. Esto porque los perfiles de demanda en los hogares son rígidos y dependen de los hábitos individuales, y también debido a la alta eficiencia energética de los electrodomésticos. Si el precio de la energía eléctrica para los hogares en México es

Bits y bytes para ahorros de CO₂

de entre 1.1 y 1.3 pesos/kWh (SENER, 2017c), y una lavadora moderna gasta aproximadamente 1 kWh por ciclo de lavado, las tarifas eléctricas flexibles no generan precios relevantes para lavar la ropa en el momento en que se tenga un exceso de oferta de energía eléctrica. El ahorro de energía no contribuye al pago de la inversión en un medidor inteligente.

En Alemania, un estudio realizado por el gobierno federal reveló el uso limitado de una instalación masiva de medidores inteligentes (EY, 2013). Ello porque en los hogares alemanes, sólo un 5 por ciento del consumo puede ser aplazado por una hora (BMW, 2014). Otros aspectos relevantes respecto a los medidores inteligentes son la seguridad de un sistema eléctrico con varios puntos de acceso y la protección de los datos de los consumidores. En este contexto, Alemania está introduciendo medidores inteligentes por etapas, empezando con grandes consumidores de energía eléctrica y casi todos los generadores distribuidos.

En relación con los costos de la introducción masiva de medidores inteligentes, cabe destacar que existe una variedad de soluciones alternativas para que estos cumplan con sus funciones principales. Una alternativa para un aumento de la información de la demanda eléctrica y para activar los potenciales para flexibilizarla, son las soluciones para la desagregación de datos de consumo. Por ejemplo, la *start-up* estadounidense Bidgely, usa algoritmos de aprendizaje de la máquina para extraer los perfiles de carga de los electrodomésticos. Apoyados en la base de datos de la empresa, colectados a través de medidores inteligentes, ofrecen también soluciones para hogares que no cuentan con medidores inteligentes. Combinando los aprendizajes de las huellas dactilares de diferentes electrodomésticos, se crea una factura de energía detallada con las 8-10 categorías principales de uso de energía, incluyendo carga base, calefacción, enfriamiento, bomba de piscina, lavandería y limpieza, entretenimiento y computadoras, calefacción de agua, cocina y otros (Bidgely, 2017). Los principales clientes son empresas eléctricas y distribuidoras que quieren flexibilizar la carga de sus clientes comerciales y residenciales.

La aplicación “*smart home*” para bajar el consumo en los hogares, es ofrecida por la empresa holandesa Smappee, usando equipos pequeños para el control de voltaje (Smappee, 2018). Otra solución para el sector residencial es la caja de enchufe conmutable de Zigbee (socket inteligente inalámbrico).

En México, unos 772,000 medidores inteligentes fueron instalados a finales de 2016, reduciendo las pérdidas no técnicas por 994.8 GWh (SENER, 2017b, pág. 139). Según el Programa de Redes Eléctricas Inteligentes de la SENER, se prevé la instalación de dos millones de equipos en los próximos años, con el objetivo de reducir las pérdidas no técnicas en las redes de distribución (SENER, 2017b, pág. 139).

Beneficios potenciales

La introducción masiva de medidores inteligentes a nivel de hogares puede ser importante para reducir las pérdidas no técnicas de energía eléctrica. Considerando los costos de medidores inteligentes, una recuperación de la inversión por ahorros del consumo energético es casi imposible en el sector residencial. Existen opciones más económicas para flexibilizar y bajar la demanda eléctrica al nivel residencial.

Bits y bytes para ahorros de CO₂

b. Gestión de carga en el comercio y la industria

En 2008, el gobierno federal de Alemania lanzó el proyecto E-Energy, “*Smart Energy Made in Germany*” (BMW, 2014, pág. 43) y financió una variedad de proyectos para la activación del potencial de ahorro de electricidad y de la flexibilización de la demanda, a través de procesos digitales en casi 4,000 hogares. Uno de los hallazgos del proyecto fue que los potenciales para transferencias de carga son mucho más altos en edificios comerciales, que en hogares. Esto por las potencias más altas que permiten desplazar e incrementar de 50 kW, a varios MW. Los proyectos piloto mostraron que hasta 20 por ciento de las cargas son desplazables, a costos de transacción mucho más bajos que en los hogares. Las aplicaciones de la gestión de carga más atractivas en los sectores comercial e industrial son:

- Sistemas de refrigeración (sobre todo congeladores)
- Procesos térmicos en la industria
- Sistemas de aire comprimido
- Sistemas de bombeo
- Baterías de carretillas elevadoras o montacargas y otros vehículos eléctricos

Consecuentemente, muchos operadores de centrales virtuales (véase apartado 3.1 b) incluyen cargas flexibles industriales y comerciales a su portafolio. También existen empresas especializadas, como Enernoc -comprada por Enel recientemente- que ofrece software de gestión energética para la optimización de procesos en la industria, y también en otros sectores. Su enfoque es la identificación de cargas flexibles y su comercialización.

Otro proveedor relevante de soluciones para la comercialización de cargas flexibles es la empresa belga ReStore. Ésta realizó proyectos con más de 150 grandes empresas industriales y comerciales. Un ejemplo es la implementación de un sistema de gestión de carga para el proveedor de materiales de construcción Holcim. Con el objetivo de bajar las emisiones de CO₂ a largo plazo, la empresa adaptó el consumo de energía de una de sus plantas al nivel del suministro de electricidad disponible, incluso hasta el punto de apagar sus equipos en caso de una escasez importante de energía eléctrica. Según ReStore, para una planta típica con una potencia pico de 140 MW, bajar la disponibilidad de energía eléctrica de 100 a 91 por ciento, permite ahorros de 50,000 toneladas de CO₂ (ReStore, 2018). Para poder alcanzar el potencial de una flexibilización de la demanda de electricidad, se requieren incentivos económicos relevantes, como tarifas eléctricas variables (*time-of-use*, TOU), o mecanismos regulatorios que permiten que agregadores o grandes consumidores reciben dinero para estar dispuestos a suministrar potencia o bajar demanda en cuanto la red lo necesita.

Beneficios potenciales

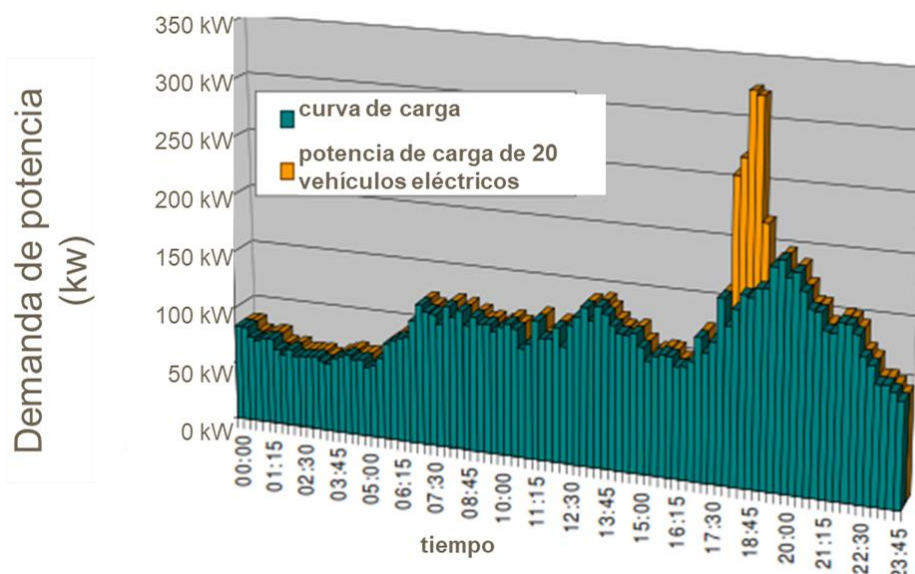
Flexibilizar la demanda eléctrica al nivel de usuarios relevantes (p.ej. industriales) es una palanca muy importante para aumentar la capacidad del sistema eléctrico para incorporar fuentes de energía intermitente.

Bits y bytes para ahorros de CO₂

c. Integrar la movilidad eléctrica

La movilidad eléctrica está en auge a nivel global y se basa en los avances de la generación eólica y fotovoltaica y de la producción de tecnologías de almacenamiento (baterías). En la actualidad, el autotransporte constituye el 42 por ciento del uso final de energía en México (SENER-SIE, 2016). Esto revela que un cambio en el consumo energético del sector transporte hacia más electricidad puede causar nuevos desafíos. Por ejemplo, una carga incontrolada de alta densidad de los vehículos eléctricos puede provocar problemas en las redes de distribución, como una subida rápida de la potencia de la carga en la red cuando una gran cantidad de conductores llega a la casa. Esto puede ocurrir, por ejemplo, a partir de las 17:30hrs, como muestra, la Gráfica 5, basada en una simulación.

Gráfica 5. Demanda de potencia en una red de distribución en un día típico, con procesos de carga no-gestionadas



Fuente: (Fraunhofer KIT, 2010, pág. 8)

El punto de partida para enfrentar este tema debería ser la "usabilidad del sistema eléctrico" de la movilidad eléctrica, es decir, una carga inteligente que también tenga en cuenta los requisitos de los operadores de la red y el mix de generación renovable. Para procesos de carga inteligente de vehículos eléctricos, se requieren enlaces comunicativos entre los autos y el sistema eléctrico. Estos pueden ser integrados en los vehículos o también en los puntos de carga. Además de esto, las baterías tienen que habilitar la carga bidireccional, es decir, la batería y el sistema de gestión de energía del vehículo deberían permitir, no sólo cargar el auto, sino también devolver a la red pública la electricidad almacenada.

Según la AIE, a nivel mundial, los procesos de carga inteligente podrían bajar la necesidad de instalar nuevas capacidades de generación eléctrica, hasta en un 46 por ciento, si existieran 150 millones de autos eléctricos, y en un 36 por ciento, si hubiera 500 millones (IEA, 2017, pág. 89). La integración de baterías de autos eléctricos agregadas en los sistemas de energía, a través de las soluciones "Vehicle2Grid", puede ser una fuente adicional de ingresos para los propietarios de vehículos en el futuro. La provisión de energía de ajuste para el mantenimiento de las frecuencias en la red de transmisión son nuevas áreas potenciales de negocio para los comerciantes de electricidad. Para esto,

Bits y bytes para ahorros de CO₂

las baterías en los autos eléctricos requieren funciones de carga bidireccional que permitan la carga y descarga, según las señales del operador del sistema.

La *start-up* alemana “*The Mobility House*” está especializada en la integración de vehículos eléctricos al sistema eléctrico. En un proyecto piloto en la Isla Porto Santo (Madeira/Portugal) implementan un software para controlar los vehículos eléctricos tanto unidireccional como bidireccionalmente, lo que permite un funcionamiento eficiente de la red eléctrica. En tiempos de baja demanda, el exceso de energía se almacena temporalmente en los vehículos eléctricos, mediante un sistema de carga bidireccional y se recupera cuando hay una mayor demanda de energía para estabilizar la red eléctrica. Esto compensa el desequilibrio entre la oferta y la demanda de electricidad y, además, garantiza la calidad de la red (The Mobility House, 2018).

Beneficios potenciales

Con sistemas de carga inteligente se puede disminuir la necesidad de instalar nuevos equipos de generación y enfrentar obstáculos relevantes de la electrificación y descarbonización del sector transporte.

3. Mercados inteligentes

El concepto de digitalización de Gartner (2018), presentado al inicio de este informe, destaca la idea de un “nuevo modelo de negocio”, lo que nos lleva a acercarnos a los “mercados inteligentes”.

En los llamados “mercados inteligentes”, se comercializan energía y servicios relacionados a ésta de manera optimizada y automatizada, facilitando así la incorporación de energías renovables a las redes eléctricas y fomentando modelos de negocio para aumentar la eficiencia energética. La difusión de mercados inteligentes está muy vinculada también con los marcos regulatorios en cuanto a la aplicación de procesos digitales en el sector energético, según la priorización de las políticas públicas.

Como se ha mencionado anteriormente, los mercados de energía están en un proceso de cambio, impulsados por la descarbonización de las economías, el despliegue de las energías renovables y las nuevas opciones para mejorar la eficiencia energética, por ejemplo, en edificios y en la industria.

Para poder comercializar energías renovables intermitentes y cargas flexibles, las exigencias a los procesos de facturación son mucho mayores. Esto aplica para diversos negocios: a través de intermediarios de mercado (3.1) como a) bolsas de electricidad (mercado eléctrico mayorista) o b) “agregadores” que integran portafolios de plantas de generación distribuidas a través de centrales virtuales. Otro ámbito de negocio emergente es el comercio de energía directa entre pares con algoritmos blockchain (3.2). Estos temas serán abordados a continuación.

3.1 Negocio a través de intermediarios de mercado

a. Mercado Spot

El mercado spot es clave para poder comercializar las energías renovables que son intermitentes y difíciles de pronosticar con una anticipación mayor a unos días. Con el auge de las energías renovables, los mercados de electricidad europeos dependen cada vez más de los productos de corto plazo de la bolsa eléctrica. Estos comercios permiten a los responsables de los grupos de balanceo ajustar sus portafolios según el pronóstico perfeccionado de la generación eólica y solar. Con la introducción masiva de las energías renovables al mercado eléctrico, en Alemania, el volumen de transacciones en el mercado del día siguiente aumentó de 136 TWh en el 2009, a 253 TWh en el 2016. La tasa de crecimiento era aún más relevante en el mercado intradiario, sin embargo, a niveles más bajos como muestra la Tabla 2.

Tabla 2. Desarrollo de los volúmenes en el mercado spot en Alemania 2009 y 2016

Plazo	Volumen 2009 en TWh	Volumen 2016 en TWh	Tasa compuesta de crecimiento anual
Mercados del día siguiente (day-ahead)	135.6	234.9	+8%
Mercados intradiarios (intraday)	5.7	38.8	+32%

Fuente (EPEX Spot, 2017, pág. 14)

La creciente capacidad de transportar y procesar datos permite plazos de entrega más cortos. Desde junio de 2017, el plazo mínimo en Alemania, entre la transacción comercial y la entrega de energía eléctrica, es de cinco minutos, lo que significa que se pueden comprar y/o vender cantidades de energía eléctrica, hasta cinco minutos antes de la inyección a la red (EPEX Spot, 2017, pág. 19). En México, desde 2016 el comercio de electricidad de corto plazo está organizado por el Mercado Eléctrico

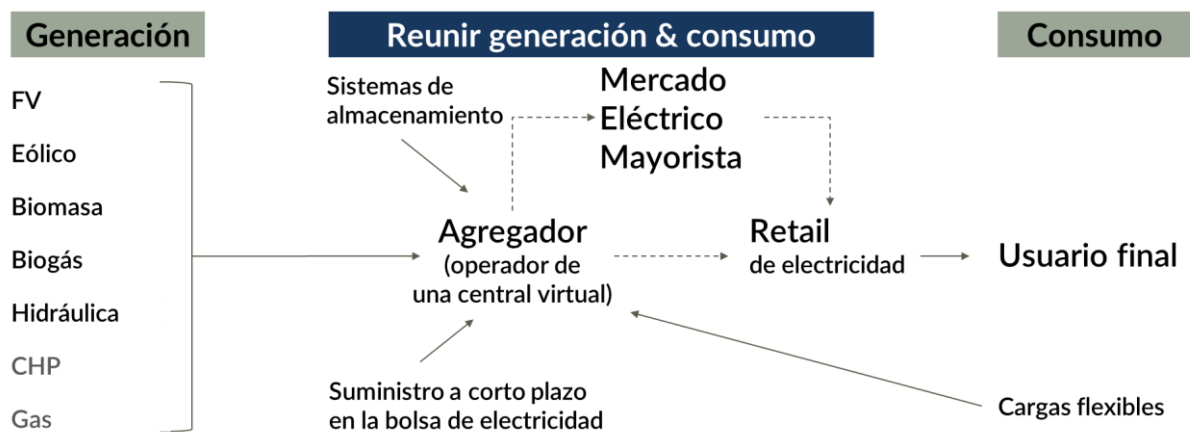
Bits y bytes para ahorros de CO₂

Mayorista (MEM) que permite la facturación de generación y demanda entre una creciente multitud de actores en tiempo real.

b. Agregadores comerciales como operadores de centrales virtuales

Además de los generadores de electricidad, un nuevo rol en el mercado eléctrico está surgiendo y expandiéndose: los agregadores comerciales, que comercian energía eléctrica (Figura 4). Su modelo de negocio consiste principalmente en la agregación de plantas de generación distribuida, consumidores flexibles y sistemas de almacenamiento. Los agregadores escalan pequeñas plantas a un volumen comercializable y reducen los costos de transacción, tanto para los operadores de planta, como para los operadores del Sistema (NRW, 2017). Normalmente reciben un porcentaje de las ganancias, por ejemplo, un 10 por ciento. En Alemania existen unas 50 empresas que ofrecen la comercialización de electricidad a operadores de plantas de energías renovables intermitentes.

Figura 4. Esquema de una central virtual de un agregador comercial



Fuente: (Büro F, 2015, pág. 102)

La función de una central eléctrica virtual es hacer un micro balance entre varias fuentes de generación, para la comercialización de energía eléctrica en bloques de energía. Las plantas eólicas y fotovoltaicas en el portafolio son complementadas por plantas rápidamente controlables de biogás, de cogeneración, de gas natural o por sistemas de almacenamiento.

Desde el punto de vista del sistema eléctrico, un operador de una central virtual crea flexibilidades rentables para compensar las fluctuaciones que se producen en el mercado y en la red. Esto conlleva a menores inversiones en la construcción de nuevas capacidades flexibles para cubrir la carga residual, como centrales eléctricas de gas, sistemas de almacenamiento, etc. Con la introducción del rol del agregador en el sistema eléctrico alemán, aumentó también la liquidez en el mercado intradiario, a través de la flexibilidad agregada, como un bien para garantizar la seguridad del suministro. Al final, los agregadores bajan los costos de transacción para los operadores del sistema que no tienen que interactuar con todos los operadores de planta.

Técnicamente, una central eléctrica virtual (*Virtual Power Plant – VPP*) es el centro de control para unidades de generación distribuida como parques eólicos, plantas solares, unidades de cogeneración, baterías y también cargas controlables. Es una plataforma para gestionar datos en tiempo real, como datos de medición, programas de producción, información sobre interrupciones y datos de mercado.

Bits y bytes para ahorros de CO₂

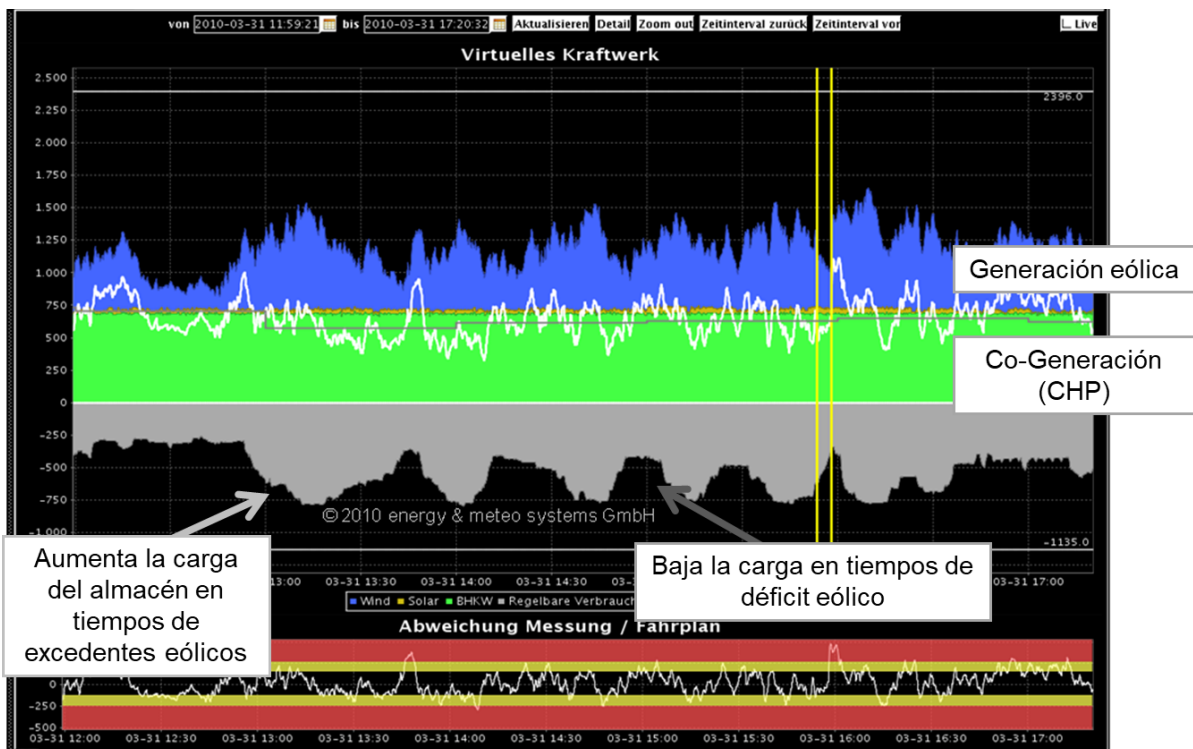
Además, permite el control remoto de portafolios de generación y lleva interfaces de comunicación con los protocolos estándar de la industria. Las centrales virtuales están disponibles como solución de software y también como un servicio. La

Figura 5 muestra un esquema de funcionamiento de una VPP.

El software para una central virtual, normalmente, incluye:

- La interconexión inteligente de los distintos generadores descentralizados para la operación de una central eléctrica virtual mediante enlaces de comunicación
- Gestión optimizada para el uso rentable de los generadores descentralizados, mediante el sistema de gestión del portafolio
- Software de pronóstico para predecir la potencia generada de energía de los parques eólicos y solares
- Estimaciones sobre los precios en los mercados energéticos spot y de ajustes con otro software especial
- Gestión de la carga optimizada, por ejemplo, descargas flexibles para períodos tarifarios o para ajustar la generación intermitente
- Interfaz de los mercados de electricidad para la comercialización

Figura 5. Ejemplo del principio de funcionamiento de una central virtual



Fuente: Energy Meteo Systems, presentación interna.

Los proveedores de software para la operación de plantas virtuales provienen del sector de la tecnología de planificación y control para centrales eléctricas convencionales (p. ej. PSI, Omnetric / Siemens, BTC Consult, ABB); del sector de proveedores de energía (p. ej. Avectrics / Xpo, Lichtblick), y del sector de pronósticos de la generación renovable (p. ej. Energy&Meteo).

Por ejemplo, la empresa alemana Energy to Market (E2M) opera una central eléctrica virtual de 3.5 GW y comercializa la energía y las capacidades en varios mercados spot y también en los mercados de ajuste para controlar la frecuencia de las redes. La empresa está especializada solamente en la

Bits y bytes para ahorros de CO₂

agregación de plantas distribuidas y en el comercio de la energía. Cuenta con todas las precalificaciones de los operadores de sistema y tiene un portafolio que permite vender bloques de energía y/o de capacidad. Otros agregadores alemanes son NextKraftwerke, EnBW y Statkraft.

En Alemania, desde 2012 las plantas de generación renovable con una capacidad mayor de 100 kW deben comercializar su electricidad directamente a usuarios finales (mayores) o en las bolsas eléctricas. Además, se aplica el telecontrol obligatorio de los sistemas, mediante un modo de control centralizado. Con los respectivos cambios de la ley de energías renovables, se introdujo el rol del agregador comercial, que hoy en día se encuentra en otros países europeos, como en Francia (DFBEW, 2017).

Beneficios potenciales

A través del micro balance, las centrales virtuales pueden reemplazar a las centrales eléctricas de carga base y minimizar el uso de energías fósiles. El aumento del despacho de las plantas de generación distribuida agregadas es uno de los impactos principales.

3.2 Negocio directo entre pares

En los últimos años, se discute el concepto de blockchain y su posible aplicación al sector eléctrico. Este concepto ofrece que las transacciones sean completamente automatizadas y verificadas, sin involucrar intermediarios del mercado como las centrales de generación, agregadores u otros actores. Mediante la tecnología Blockchain se pueden organizar, documentar y verificar contratos inteligentes entre pares (vea Figura 3 arriba). La aplicación actual más frecuente del blockchain es la optimización de procesos de facturación de energía en empresas eléctricas o entre diferentes actores, con el objetivo final de ajustar el flujo real de energía con la facturación a nivel local.

En un caso piloto en el sur de Alemania, los vecinos de un barrio específico pueden intercambiar electricidad entre sí, veinte hogares se encuentran conectados a una plataforma de comercio basada en el blockchain. De esta manera, se puede comercializar la energía verde producida localmente entre los vecinos. A través de una aplicación para el smartphone, los hogares pueden ajustar sus preferencias y los precios que desean recibir por sus excesos de generación y/o los precios que están dispuestos a pagar por la energía eléctrica. El comercio en sí mismo es manejado en la plataforma por agentes automáticos. Los datos de generación y consumo se recogen a través de medidores inteligentes especiales, se les almacena y procesa en un blockchain. La aplicación para el smartphone permite el acceso a cada participante a sus datos individuales de operaciones y carga (Fraunhofer KIT, 2017). Con este proyecto, se pretende mejorar los conocimientos prácticos si estos mecanismos de mercado funcionaran a niveles locales y regionales. Un socio principal del proyecto es la start-up neoyorquina LO3 Energy (que fue comprado por Siemens), cuyo programa “Brooklyn Microgrid” es uno de los proyectos de blockchain más conocidos en el sector energético. Otros socios son la empresa eléctrica municipal “Energie Südwest” y el Instituto Fraunhofer KIT que han participado en el proyecto de microredes de Landau (

Bits y bytes para ahorros de CO₂

Figura 6).

Figura 6. El Landau Microgrid Project: blockchain para comercio directo de electricidad



Fuente: (Fraunhofer KIT, 2017)

Otra aplicación relevante es la combinación del flujo de carga física y la facturación de la energía, por ejemplo, a través de comprobantes de origen digital. En un proyecto piloto de una empresa municipal, en cooperación con una start-up digital en Alemania, se utiliza el blockchain para etiquetar la electricidad verde y remunerarla con "GreenPowerJetons"¹. En la región seleccionada, se mide el consumo individual con medidores inteligentes y se entregan fichas correspondientes al porcentaje de electricidad verde en las redes locales, derivado de pronósticos de generación. Esta manera de incentivar el consumo de energía en tiempos de alta generación de energías renovables se gestiona a través de procesos blockchain (Stromstunde, 2016).

Con enfoque en los comprobantes de origen de la electricidad generada a través de fuentes renovables, el startup británico Swytch ofrece una solución basada en blockchain. Cada kWh generado emite una ficha (un token) que puede teóricamente ser comerciable a nivel global (Swytch, 2018). Otro ejemplo para la aplicación del blockchain en el sector eléctrico, es el proyecto del operador del sistema alemán Tennet con el proveedor de baterías solares Sonnen (Véase el apartado 3.2 b).

Beneficios potenciales

El impacto en las emisiones de GEI de la aplicación del blockchain en el sector energético no es aún cuantificable. No obstante, la aplicación del blockchain para la flexibilización del sistema y los mercados de energía, permitiría una mayor participación de energías renovables bajo nuevos esquemas de costo y transacción. Es importante considerar que el consumo energético adicional del proceso y el desarrollo rápido de esta tecnología.

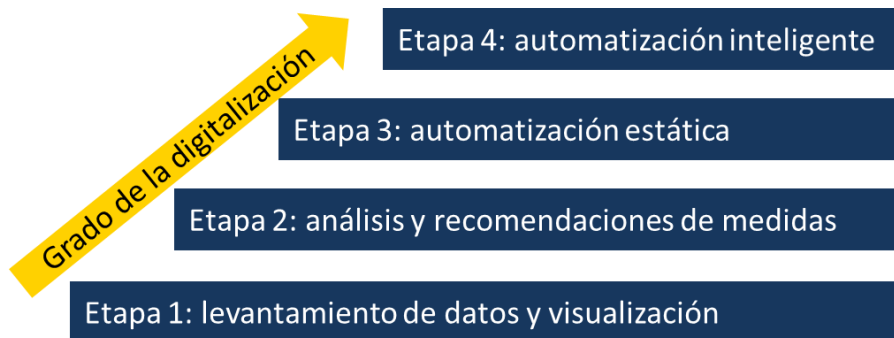
¹ Se trata de una combinación de medidores inteligentes, blockchain y generación de energías renovables en tiempo real a escala regional, con el objetivo de conjuntar flujos físicos y financieros para electricidad verde (Büro F, 2016)

4. Eficiencia energética

Bajar el consumo de energía en todos los sectores es fundamental para poder a su vez disminuir las emisiones de GEI asociadas y para lograr una descarbonización eficiente de la economía. Un desafío clave para los proyectos de eficiencia energética es la complejidad y la multitud de los casos. Hace unos años existían muy pocas soluciones estandarizadas para la medición detallada del consumo energético de diferentes unidades (por ejemplo, en un edificio o en un proceso de producción industrial) y el cálculo de los respectivos costos asociados de la energía.

La digitalización permite que sea mucho más factible levantar bases de datos de consumo y analizarlas con respecto a las cantidades de energía usadas, incluyendo las emisiones GEI y los costos asociados. También la gestión automatizada de diferentes procesos en la industria y en edificios es cada vez más factible. Estos avances tecnológicos-digitales tienen un muy alto potencial para impulsar el despliegue de la eficiencia energética. Las diferentes etapas de la digitalización en el ámbito de proyectos de eficiencia energética muestran diferentes niveles de digitalización. La gestión automática estática de la iluminación en un edificio inteligente o la automatización de procesos de producción con algoritmos capaces de aprender, son procesos de control altamente digitalizados (Figura 7).

Figura 7. Grado de la digitalización actual de soluciones para la eficiencia energética



Fuente: Elaboración propia, basada en (Dena, 2017, pág. 9)

Los siguientes apartados, presentan una introducción a las opciones digitales para aumentar la eficiencia energética en la industria, en el sector de la construcción y en las edificaciones en general.

4.1 Datos y automatización en la industria

Aumentar la transparencia sobre el uso de energía es mucho más factible y preciso con la aplicación de procesos digitales. El levantamiento de datos para poder identificar medidas para disminuir el consumo energético es la precondition y uno de los ámbitos donde surgen inmensos potenciales nuevos a través de procesos digitales. Los costos de sistemas de medición y de la evaluación de datos está disminuyendo continuamente.

En la industria, la mayor disponibilidad de información facilita entender mejor la relación entre procesos de producción y automatización, por un lado, y el consumo de energía asociado, por el otro. La conexión de la planificación de procesos de producción con el consumo de energía de las plantas, requiere una multitud de información sobre los patrones de consumo energético de los diferentes

Bits y bytes para ahorros de CO₂

procesos y sus interrelaciones. Se pueden generar estos datos con sistemas de medición completa, implementando una multitud de sensores.

Los sensores inteligentes miden diferentes parámetros, por ejemplo, las condiciones de operación, el estatus del equipo y el consumo de energía. Estos datos permiten la identificación de ineficiencias en el sistema y el desarrollo de esquemas de operación y mantenimiento para reducir los tiempos de paro del suministro. Esto incluye también algoritmos de mantenimiento predictivo que están basados en datos históricos y en la variedad de datos disponibles en tiempo real (véase también 3.2 b).

Una estimación agregada de la aplicación de procesos digitales en los diferentes sectores industriales europeos revela un amplio espectro de ahorros entre el 10 por ciento, en la industria del acero, y el 40 por ciento en la producción de semiconductores (EU Commission, 2008, pág. 15). Por su parte, un análisis del potencial de aplicaciones de controles de proceso mejorados en el sector manufacturero australiano revela un potencial de ahorro agregado del 11.4 por ciento (ClimateWorks Australia, 2012, pág. 9).

Por ejemplo, en la producción de semiconductores, aproximadamente el 30 por ciento de los sistemas operan temporalmente en modo *stand-by*. El consumo en dicho modo suma aproximadamente el 60 por ciento del consumo de energía, en comparación con el modo de funcionamiento completo. Si se apagan en su totalidad los equipos que se encuentran en modo *stand-by*, se puede bajar el consumo de energía del 60 al 40 por ciento (ZVEI, 2017, pág. 5). Otra fuente indica que se pueden realizar ahorros de todo el consumo de energía del 5 al 10 por ciento, sólo por la identificación de situaciones operacionales que derrochen energía (ENIT, 2018).

La estandarización de medidas para aumentar la eficiencia energética en distintos ámbitos está avanzando por la creciente disponibilidad de software de monitoreo y optimización, que es aplicable en diferentes procesos en distintas industrias. Un ejemplo de esta reducción de la complejidad es la solución de la empresa Enit Systems, derivada del Instituto Fraunhofer ISI. Enit Systems ofrece un paquete para la recopilación, preparación, salida y control de datos. La caja de medición incorpora un servidor web, un servidor de aplicaciones, una base de datos y un registrador de datos.

Los sistemas de gestión de energía avanzados gestionan los procesos de producción de manera automatizada, y continúan optimizándolos. Un ejemplo de una implementación holística de aplicaciones digitales para un aumento de la eficiencia energética es la optimización del sistema de aire comprimido de la fábrica de productos químicos alemana “Chemische Fabrik Budenheim KG”. La gestión digital de los sistemas de aire comprimido distribuidos, la instalación de nuevos sistemas de medición de potencia, la reducción de la presión del proceso y el monitoreo continuo de fugas de energía llevó a un ahorro del uso de energía del 32 por ciento. Este ahorro es equivalente a una emisión de 807 toneladas de CO₂ por año. Esto se realizó con una inversión de 1 millón de Euros y ha logrado ahorros por unos 200,000 Euros por año (Fraunhofer IPA, 2015, pág. 5).

En México, la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) publicó en 2018 la Hoja de Ruta para la Eficiencia Energética en el Sector Industrial (CONUEE, 2018), en donde se identificaron 50 medidas técnicas y de buenas prácticas orientadas a promover la eficiencia energética en el sector industrial (por una evaluación comparativa de benchmarking internacional), de las cuales, 37 medidas resultaron viables, desde el punto de vista de su evaluación técnico-económica. Con estas 37 medidas socialmente viables, de acuerdo al estudio, el ahorro energético al 2030 proveniente de estas disposiciones sería del 8.2 por ciento del consumo del 2030 en el BAU y las emisiones de GEI se reducirían un 8.5 por ciento, con respecto al total de industria, al 2030 del BAU; su implementación le daría a México un ahorro de energía acumulado, al año 2030, de 1,857 PJ y un ahorro neto (beneficios) de \$5,937 MUSD (CONUEE, 2018).

Beneficios potenciales

Basado en las diferentes estimaciones, se puede evaluar una disminución del consumo energético en la industria por la aplicación de diferentes procesos digitales entre 10-40%. En México, el potencial de mitigación asociado a la disminución del consumo energético en la industria puede insertarse en las estimaciones de la hoja de ruta para dicho sector.

4.2 Datos y automatización en el sector de la edificación

La digitalización permite un aumento de la eficiencia energética desde la fase de la planificación de edificios y también en la gestión automatizada del uso de energía cuando el edificio se encuentra en operación. En el sector de la construcción, el Modelado de Información de Construcción (*Building Information Modeling – BIM*) permite conectar los oficios involucrados desde el proceso del diseño del inmueble. Con este método digitalizado, se modela un edificio como un gemelo virtual. En la fase de planeación se prueba y corrige el modelo continuamente. Los sistemas BIM se extienden más allá del proceso de construcción a toda la vida útil del edificio. De este modo, se puede estimar el consumo de energía de un edificio en toda su vida útil de manera anticipada (ZVEI, 2017, pág. 7). La start-up alemana *Metabild* está desarrollando un software de simulación para mejorar la calidad energética y el confort de inmuebles nuevos. El programa utiliza simulaciones paramétricas del edificio, facilitando probar el impacto al consumo energético de una variedad de materiales y tecnologías, por ejemplo, materiales de aislamiento, acristalamiento, sistemas de calefacción, sistemas de refrigeración, sistemas de ventilación, iluminación, plantas fotovoltaicas, sistemas de almacenamiento (Metabild, 2018). Otro proveedor de un software parecido es la empresa emergente Caala.

Según los datos de un desarrollador de proyectos británico, se puede bajar el consumo de materiales en la fase de la construcción en un 30 por ciento aplicando el BIM. Con respecto al uso de energía durante la utilización del edificio, se pueden realizar ahorros del 15 al 20 por ciento con la aplicación de sistemas BIM en comparación a los sistemas reales (Petri et al., 2017, pág. 5).

Aunque con 5 por ciento de las emisiones GEI del país, el aporte de los edificios comerciales y residenciales a las emisiones GEI no es el más relevante en México, es útil mencionar algunas soluciones digitales que permiten bajar el consumo energético en edificios. En este ámbito, la gestión de la iluminación y de la provisión de calor son los puntos clave para poder disminuir el consumo de energía. A través de sensores y sistemas de automatización y control de edificios (*Building Automation and Control Systems – BACS*), se puede mejorar la capacidad de respuesta de los servicios energéticos o pronosticar el comportamiento del usuario y la demanda de energía, usando también datos meteorológicos. Los sistemas de iluminación inteligentes, que son básicamente lámparas LED, conectados a sistemas de control de edificios, son capaces de procesar las preferencias del usuario, condiciones de luz natural y la ocupación del edificio. Según la AIE, se pueden obtener ahorros del 14 por ciento en el uso de la energía por iluminación a nivel mundial, entre 2017 y 2040, adicionales a los ahorros generados por el cambio hacia la tecnología LED (IEA, 2017, pág. 46).

Otro ahorro aún más relevante puede ser alcanzado por la gestión de enfriamiento y de la calefacción de edificios. Termostatos inteligentes se encargan del monitoreo y del control de cargas de enfriamiento y calentamiento. Cuentan con algoritmos de aprendizaje automatizado, permitiendo una mejor gestión de la demanda de energía en un edificio o una zona definida dentro de un edificio, utilizando información sobre la presencia y la rutina de los ocupantes y los pronósticos meteorológicos.

La empresa alemana Tado es un fabricante de soluciones inteligentes de climatización para hogares y produce termostatos y controles inteligentes de aire acondicionado. Los controles de los sistemas

Bits y bytes para ahorros de CO₂

térmicos están conectados con el smartphone del usuario. A través de una aplicación se puede controlar el sistema de manera remota. La aplicación tiene acceso a los datos de movimiento del smartphone, identificando el sistema si el usuario se encuentra de camino a casa. También incluye datos meteorológicos para bajar la temperatura del aire acondicionado en días nublados. Según la empresa, el sistema es compatible con casi todos los sistemas de calefacción y enfriamiento y su instalación es muy fácil. Prometen una disminución del consumo de electricidad en los sistemas de aire acondicionado de hasta un 40 por ciento, con una inversión de 180 Euros. Para sistemas de calefacción (p.ej. de gas) prometen un descenso de los costos de calefacción, hasta del 31 por ciento (Tado, 2018). Con base en investigaciones de facturas de electricidad de usuarios, en 41 estados de los Estados Unidos, el competidor Google Nest afirma ahorros de energía de entre 10 y 12 por ciento, para los sistemas de calefacción y del 15 por ciento, para sistemas de enfriamiento centralizados (Nest, 2015, pág. 2).

Beneficios potenciales

En la fase de construcción de edificios, se puede disminuir el uso de materiales hasta un 30 por ciento aplicando procesos de planificación digital. El uso de energía puede ser reducido durante la vida útil del edificio gracias a modelación previa. Para la operación de edificios existentes, los sistemas de control automatizados pueden contribuir a un descenso del consumo de energía por los sistemas de iluminación. Métodos parecidos de control de aire acondicionado y calefacción permiten disminuir la provisión de calor y del enfriamiento.

La Tabla 3 muestra una síntesis de las áreas de incidencia de las prácticas revisadas en materia de redes inteligentes, mercados inteligentes y eficiencia energética, considerando las actividades de generación de energía, la interfaz generación-demanda y la demanda de energía.

Tabla 3. Agrupación de acciones de digitalización para redes inteligentes, mercados inteligentes y eficiencia energética en la generación y demanda de energía

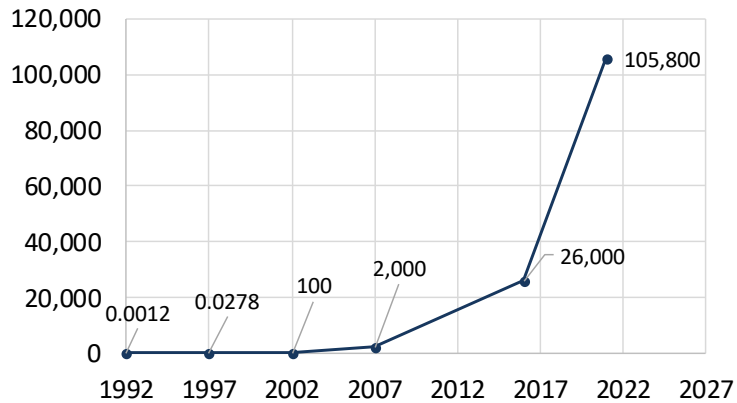
	Generación de energía	Interfaz generación-demanda	Demanda de energía
Redes inteligentes	Pronósticos de la generación de ER (2.1)	Operación y mantenimiento automatizada de las redes (2.2)	Gestión de carga (2.3)
Mercados inteligentes		Agregación (3.1) Negocio directo (3.2)	
Eficiencia energética			Industria (4.1) Edificación (4.2)

Fuente. Elaboración propia, 2018

5. Consumo energético adicional por procesos digitales

El efecto directo del levantamiento, transporte y procesamiento de datos en el consumo de energía es otra faceta de la moneda de la digitalización. Se estima que la cantidad del tráfico mundial de internet se cuadruplicará entre 2016 y 2021, de acuerdo a lo que muestra la Gráfica 6.

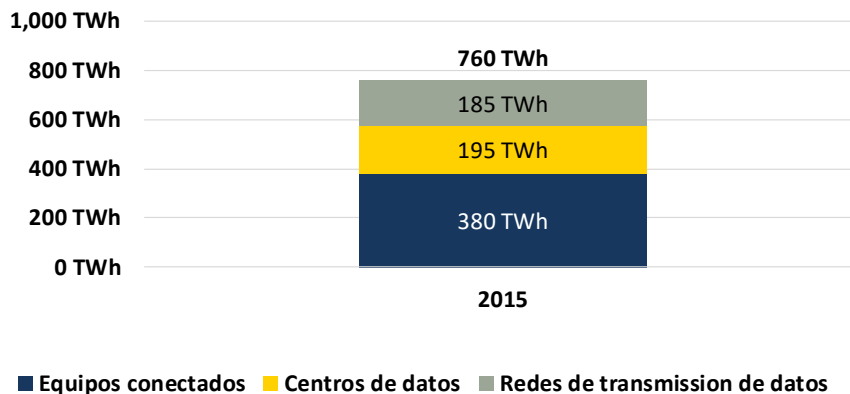
Gráfica 6. Tráfico mundial de internet (GB por segundo)



Fuente: Elaboración propia, basada en (Cisco, 2017, pág. 5)

Según Greenpeace, el consumo energético del sector de tecnologías de la información y comunicación (TIC), incluyendo la fabricación de los equipos, sumó 1,817 TWh en el año 2012. De acuerdo a la organización, “si fuera un país, el sector TIC hubiera sido el tercer mayor usuario de electricidad del mundo” (Greenpeace, 2017, pág. 16). Según estimaciones de la AIE y otros, se puede asumir que el consumo de energía eléctrica por procesos digitales sumó 760 TWh en el año 2015. Esto sería un 3.4 por ciento del consumo de electricidad a nivel mundial. Debido a los enormes costos energéticos para la fabricación de los equipos conectados, esta cifra podría ser más alta. Por ejemplo, tres cuartas partes del consumo de energía de una tableta electrónica durante su vida útil están asociadas con su fabricación, y para el caso de las computadoras, dicho consumo de energía corresponde a la mitad (IEA, 2017, pág. 113). La siguiente grafica muestra el consumo de energía eléctrica adicional de 760 TWh/a por procesos digitales al nivel mundial según la IEA, sin considerar los procesos de fabricación.

Gráfica 7. Consumo de energía por procesos digitales a nivel global (sin procesos de fabricación de equipos)

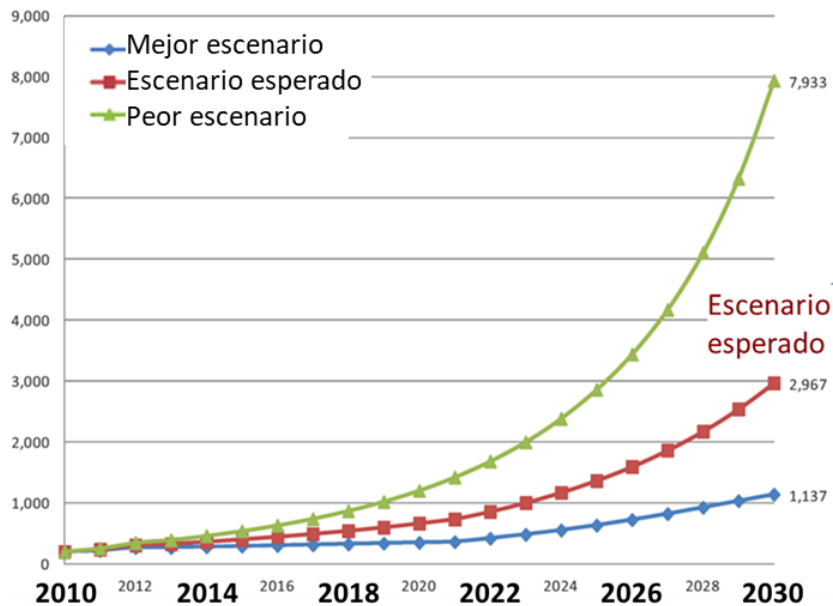


Fuente: Elaboración propia basada en (IEA, 2017, pág. 105ff).

Bits y bytes para ahorros de CO₂

Si bien, la cuantificación del estatus actual del consumo energético asociado a procesos TIC es compleja, lo es del mismo modo la proyección de dicho consumo. Un aumento en la eficiencia energética de la operación de centros de datos y en centros hiper centralizados permitiría suponer que la demanda se mantendría estable en los próximos años. La AIE calcula una tasa compuesta de crecimiento anual de 0.5 por ciento entre 2014 y 2020 en este sector (IEA, 2017, pág. 105). Otros estudios prevén un aumento fuerte en la década del 2020 (Andrae/Eder, 2015) (Gráfica 8).

Gráfica 8. Consumo de electricidad de centros de datos / servidores en TWh 2010-2030



Fuente: (Andrae/Eder, 2015, pág. 133)

Para la transmisión de datos, la AIE prevé una tasa compuesta de crecimiento anual del 9.6 por ciento, entre 2015 y 2021, conducido por la creciente demanda de los mercados de consumo privado - sobre todo para la transmisión de videos por internet. El consumo privado representa un 80 por ciento de la transmisión de datos (IEA, 2017, pág. 109).

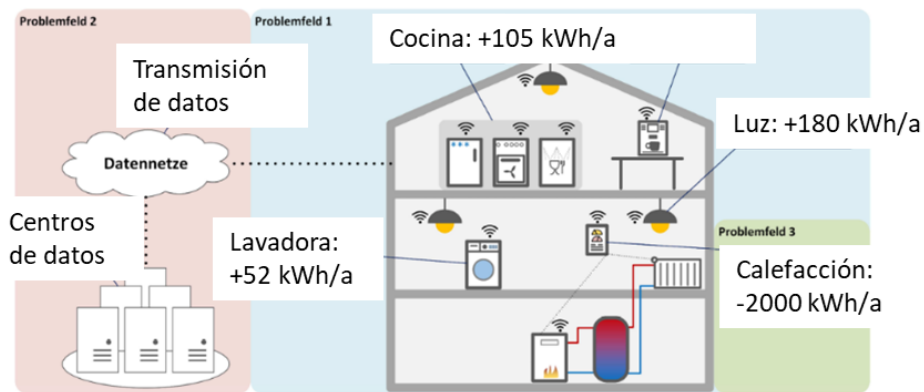
El efecto cuestionable de la digitalización respecto al consumo energético es también observable en el consumo de energía en los hogares. Según los escenarios de la AIE, en el año 2040, el 50 por ciento de la demanda de energía en los hogares provendrá de equipos conectados, aumentando la demanda para energía en stand by (IEA, 2017, pág. 43). Un estudio del Instituto Borderstep de Alemania reveló que las aplicaciones para hogares inteligentes, las llamadas *smart homes*, aumentan el consumo de energía eléctrica en 337 kWh/a, sin considerar los gastos de energía en el proceso de producción y transmisión de los datos y su procesamiento y almacenamiento en los centros de datos (Borderstep, 2018) (

Bits y bytes para ahorros de CO₂

Figura 8).

Bits y bytes para ahorros de CO₂

Figura 8. Efecto de electrodomésticos conectados al consumo de electricidad anual en una vivienda



Fuente: (Borderstep, 2018, pág. 21)

Un uso adicional por los procesos digitales, que, principalmente, aumentan la eficiencia energética, debe considerar los posibles efectos en el consumo energético asociado al desarrollo tecnológico. Uno de ellos es el llamado efecto rebote, que, pese a que una mayor eficiencia debería conducir a un menor uso de la energía y emisiones, lleva a un consumo de energía creciente. En el pasado, las tecnologías más eficientes, como la máquina de vapor o el motor eléctrico aumentaban el uso de energía en la sociedad a medida que las economías acrecentaban su productividad.

Conclusiones

Los procesos de transformación digital en el sector energético tienen un vínculo relevante con el alcance de las metas climáticas. Para que la digitalización tenga un impacto positivo a las emisiones de GEI, se requieren intervenciones políticas y un marco regulatorio que destaque los aspectos positivos y limite los impactos negativos.

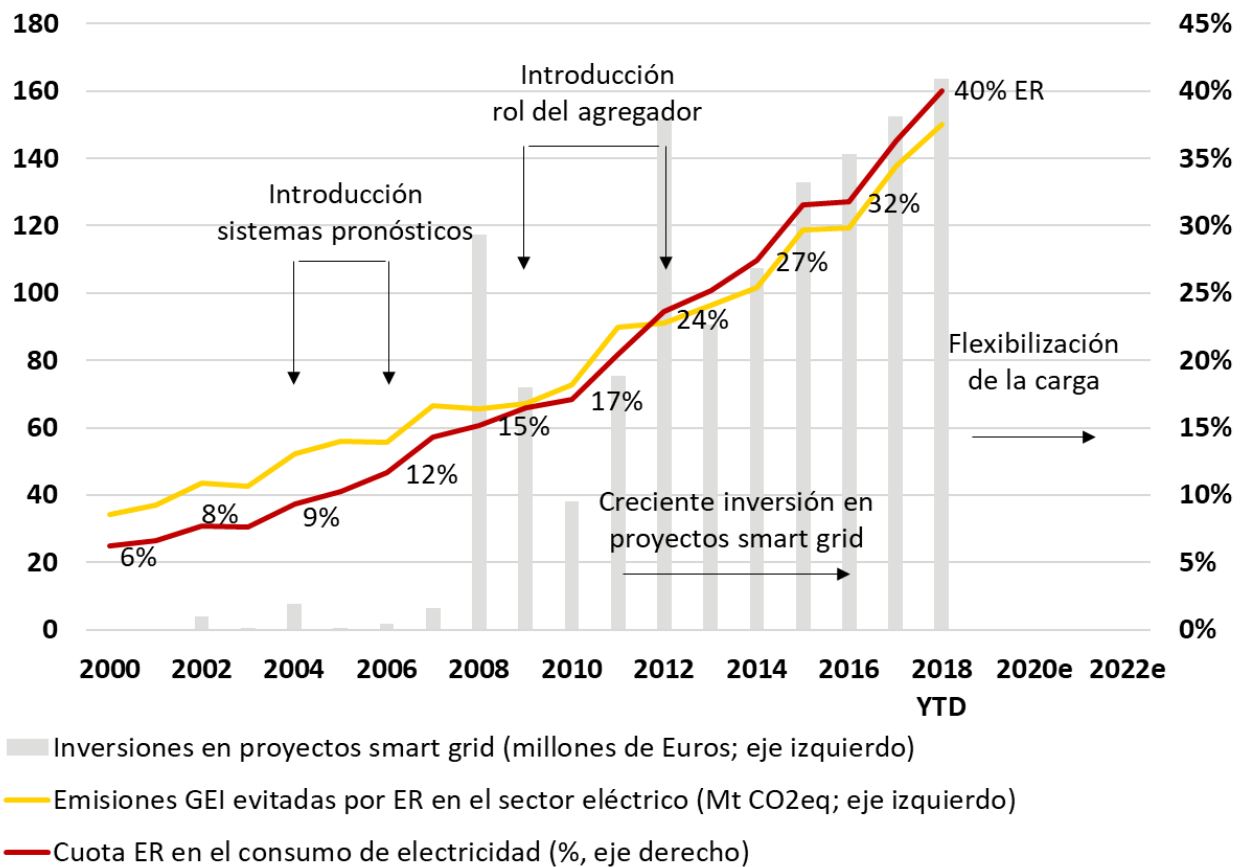
En el sector energético, tanto en México como en Alemania, existe una gama de opciones que podrían aumentar la mitigación de GEI si se adoptan procesos digitales. Un eje fundamental es el aumento de la flexibilidad de este sector, a través de TICs que permiten la integración de proporciones mayores de energías renovables intermitentes, como la eólica y la solar. Existen también altos potenciales para la eficiencia energética: los avances en la tecnología de sensores y las capacidades de transportar y procesar datos, permiten identificar malgastos de energía, optimizar y controlar sistemas complejos. Por otro lado, el aumento del tráfico de datos y de los procesos de información y comunicación de las tecnologías digitales, supone un crecimiento del consumo mundial de energía, cuyas emisiones deben tenerse en cuenta para hacer frente a sus impactos climáticos negativos.

Para el sector eléctrico, la experiencia de la integración de tasas crecientes de energías renovables intermitentes al sistema eléctrico alemán puede dar una indicación de las soluciones digitales requeridas en cada etapa. Del año 2000, hasta el primer semestre del 2018, el aporte de energías renovables en el consumo de electricidad en Alemania creció del 6 al 40 por ciento. La instalación masiva de plantas eólicas y fotovoltaicas ha evitado la emisión de 150 millones de toneladas equivalentes de CO₂ en el año 2018. En este proceso de auge, se implementaron varias medidas digitales para permitir una mayor recepción de las energías renovables intermitentes y distribuidas por el sistema eléctrico, las cuales constituyen lecciones aprendidas:

- Con una tasa del 10 por ciento de energías renovables, los operadores del sistema introdujeron métodos avanzados de pronósticos de la generación eólica y fotovoltaica.
- Debido a una tasa del 15 por ciento, el regulador introdujo gradualmente el rol del agregador que provee un micro balanceo, a través de un portafolio de plantas de generación distribuida (centrales virtuales).
- A partir del rango del 15 por ciento de energías renovables, las inversiones en aplicaciones para redes inteligentes, sistemas de operación inteligente del sistema o para la integración de la generación distribuida, muestran un crecimiento dentro del sistema eléctrico, incluyendo sistemas avanzados de medición para el monitoreo de las redes eléctricas. Entre 2008 y 2015, se invirtió un monto de alrededor de 100 millones de euros anualmente, sólo en proyectos piloto y demostrativos.
- En Alemania, el despliegue de medidores inteligentes y otras medidas de gestión de carga están todavía frenadas por problemas de certificación de los equipos y la falta de señales de precio para incentivar la flexibilización (Gráfica 9).

Bits y bytes para ahorros de CO₂

Gráfica 9. El despliegue de las energías renovables en el sector eléctrico en Alemania y el rol de las soluciones digitales



Fuentes: Elaboración propia, basada en (BMW, 2018, pág. #20) (UBA, 2018) (FISE, 2018) (JRC, 2017)

El efecto de la digitalización para la mitigación de emisiones de GEI en México aún está por estimarse. Los ahorros derivados de la integración de energías renovables a los sistemas energéticos y de un aumento de la eficiencia energética en edificios y procesos industriales, pueden ser neutralizados por un consumo adicional en el sector privado, mientras que la incorporación de procesos y tecnologías digitales en las actividades de generación y transmisión, pueden aumentar la flexibilidad del sistema para una mayor incorporación de energías renovables a la red eléctrica. Más ejercicios técnicos de modelación y minería de datos son requeridos para la estimación de potenciales.

En México, la discusión sobre el potencial de mitigación asociado a procesos digitales precisa la construcción de un diálogo interinstitucional serio entre el sector climático y el energético. Asimismo, requiere generar instrumentos, modelaciones y estimaciones que permitan asociar estas acciones a valores que posibiliten conocer la interconexión de dichos esfuerzos con el cumplimiento de las metas climáticas de México, así como de sus metas de generación de energías limpias. En dicho proceso, un análisis sobre las medidas costo efectivas de digitalización y sus efectos y co-beneficios para el sector climático y energético orientado a su implementación, puede ser un primer paso para buscar cubrir la brecha digital en el sector, al mismo tiempo que se reconocen sus beneficios sociales, ambientales y económicos.

Referencias

- 50 Hertz. (04 de 2016). *50 Hertz Transmission*. Present and future challenges of RES integration: [presentación interna]
- 50 Hertz. (03 de 2018). *50 Hertz Transmission*. 50Hertz presents 2017 balance sheet: New feed-in record at 50Hertz: <http://www.50hertz.com/en/Media/Press-releases>
- Agora. (12 de 2017). *Agora Energiewende*. Optimierung der Stromnetze: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/Innovative_Netze_Toolbox/Agora_Optimierung-der-Stromnetze_WEB.pdf
- Andrae/Eder. (04 de 2015). *On global electricity usage of communication technology: trends to 2030*. https://www.researchgate.net/profile/Anders_Andrae/publication/275653947_On_Global_Electricity_Usage_of_Communication_Technology_Trends_to_2030/links/55433a9e0cf23ff7168380dd/On-Global-Electricity-Usage-of-Communication-Technology-Trends-to-2030.pdf
- Bigdely. (07 de 2017). *Reaching 100% of Homes*. <http://www.bigdely.com/blog/reaching-100-of-homes/>
- BMWi. (05 de 2014). *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*. E-Energy. Smart Energy Made in Germany: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/smart-energy-made-in-germany.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- BMWi. (05 de 2018). *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*. Energy Data, Sheet #20: <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Artikel/Energie/energy-data.html>
- BNEF. (11 de 2017). *Bloomberg New Energy Finance*. Digitalization of Energy Systems.
- Borderstep. (01 de 2018). *Borderstep Institute*. Smarte Rahmenbedingungen für Energie- und Ressourceneinsparungen bei vernetzten Haushaltsprodukten: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2018/07/energiewende_studie_vernetzte_produkte.pdf
- Büro F. (11 de 2015). *Energy Business Lab: Neue Geschäftsmodelle in dezentralen und digitalisierten Strommärkten*.
- Büro F. (11 2016). *Batteries, bits and business. Latest trends in the German energy transition*. Von www.burof.de/research
- Cenace. (2016). *Sistema de Información del Mercado*. Mercado y Operaciones : <https://www.cenace.gob.mx/MercadoOperacion.aspx>
- Cisco. (06 de 2017). *The Zettabyte Era: Trends and Analysis*. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.pdf>
- ClimateWorks Australia. (07 de 2012). *Inputs to the Energy Savings Initiative Modelling from the Industrial Energy Efficiency Data Analysis Project*. https://www.climateworksaustralia.org/sites/default/files/documents/publications/climateworks_esi_ieedap_report_jul2012_0.pdf

Bits y bytes para ahorros de CO₂

- ComMetering. (2018). *Messstellenbetrieb*.
<https://www.commetering.de/produkte/messstellenbetrieb/>
- Dena. (11 de 2017). *Deutsche Energie-Agentur*. Digitalisierung als Enabler für die Steigerung der Energieeffizienz:
https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9228_dena-Analyse_Digitalisierung_Enabler_Steigerung_Energieeffizienz.pdf
- DFBEW. (08 de 2017). *Deutsch-Französisches Büro für die Energiewende*. Direktvermarktung von erneuerbaren Energien an der Strombörse: https://energie-fr-de.eu/de/systeme-maerkte/nachrichten/leser/hintergrundpapier-zur-direktvermarktung-von-erneuerbaren-energien-an-der-stromboerse.html?file=files/ofaenr/04-notes-de-synthese/02-access-libre/04-systemes-et-marches/171002_Hintergrundpapier_E
- Dinero en Imagen. (08 2017). *Sener lanza programa para redes eléctricas inteligentes*. Von <https://www.dineroenimagen.com/2017-08-22/90066>
- Earth League and Future Earth. (2017). *The 10 Science "Must Knows" on Climate Change*.
http://www.the-earth-league.org/uploads/2/4/5/9/24599880/the_10_science_must_knows_on_climate_change.pdf
- Ecofys. (03 de 2017). *Optimising the energy use of technical building systems*.
<https://www.ecofys.com/files/files/ecofys-2017-optimising-the-energy-use-of-tbs-final-report.pdf>
- Enercon. (2016). *Grid Technology*. Von <https://www.enercon.de/en/technology/grid-technology/>
- ENIT. (2018). *Enit Systems*. Example of Cost Savings: <https://www.enit-systems.com/en/cost-savings/examples-af-cost-savings/>
- EPEX Spot. (08 de 2017). *Direktvermarktung von erneuerbaren Energien an der Strombörse*.
http://static.epexspot.com/document/38035/171002_Hintergrundpapier_Direktvermarktung_EPEX_OFATE_FINAL.pdf
- EU Commission. (10 de 2008). *DG Information Society and Media*. ICT for Energy Efficiency:
http://ec.europa.eu/information_society/activities/sustainable_growth/docs/consultations/advisory_group_reports/ad-hoc_advisory_group_report.pdf
- EY. (07 de 2013). *Ernst & Young*. Kosten-Nutzen-Analyse für einen flächendeckenden Einsatz intelligenter Zähler: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/kosten-nutzen-analyse-fuer-flaechendeckenden-einsatz-intelligenterzaehler.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- FISE. (09 de 2018). *Fraunhofer ISE*. Energy Charts: https://www.energy-charts.de/ren_share.htm?source=ren-share&period=annual&year=all
- Fraunhofer IPA. (10 de 2015). *Energieeffizienz und Industrie 4.0*. Energieeffizienz durch Digitalisierung in der Prozessindustrie: http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-3703827.pdf
- Fraunhofer KIT. (2010). Impact of E-Mobility on Electrical Grid:
http://www.kit.edu/downloads/Forschen-Intranet/2010-03-25_CASysPro_05_Reiner.pdf
- Fraunhofer KIT. (10 de 2017). *Landau Microgrid Project*.
https://im.iism.kit.edu/english/1093_2058.php

Bits y bytes para ahorros de CO₂

- Gartner. (2018). *IT Glossary*. <https://www.gartner.com/it-glossary/digitalization/>
- GE. (01 de 2016). *General Electric*. Electric Value Network: <https://www.ge.com/digital/sites/default/files/EVN-Solutions-for-Power-and-Utilities-from-GE-Digital.pdf>
- GIZ. (06 de 2015). *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH*. Variable renewable energy forecasting - integration into electricity grids and markets - a best practice guide: https://energypedia.info/images/2/2a/Discussion_Series_06_Technology_web.pdf
- González, N. (08 de 2017). *Sener lanza programa para redes eléctricas inteligentes*. *Dinero en imagen*. <https://www.dineroenimagen.com/2017-08-22/90066>
- Greenpeace. (01 de 2017). *Clicking Green: Who is winning the race to build a green internet?* <http://www.clickclean.org/downloads/ClickClean2016%20HiRes.pdf>
- Greenpeace. (2017). *Clicking Green: Who is winning the race to build a green internet?* . https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/20170110_greenpeace_clicking_clean.pdf
- Horner et al. (11 de 2016). *Environmental Research Letters*. Known unknowns: indirect energy effects of information and communication technology: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/10/103001/pdf>
- IEA. (2017). *International Energy Agency*. Digitalization & Energy: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/DigitalizationandEnergy3.pdf>
- INDC. (12 de 2015). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. Compromisos de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático para el Periodo 2020-2030: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/39248/2015_indc_esp.pdf
- INECC. (2015). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI) : <https://datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-inegycei>
- INECC. (18 de 05 de 2018a). *Efectos del cambio climático*. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/efectos-del-cambio-climatico>
- INECC. (03 de 2018b). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero*. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>
- JRC. (2017). *Joint Research Centre - Smart Electricity Systems*. Smart grid projects investment per application: <http://ses.jrc.ec.europa.eu/smart-grid-projects-investment-application>
- Metabild. (2018). <https://www.metabuild.io/>
- Nest. (02 de 2015). *Energy Savings from the Nest learning thermostat: energy bill analysis results*. White Paper: downloads.nest.com/press/documents/energy-savings-white-paper.pdf
- NRW. (2017). *Energieagentur NRW*. Aggregatoren: <https://www.energieagentur.nrw/systemtransformation/energiemarktdesign/aggregatoren>
- Petri et al. (04 de 2017). *Ioan Petri et al*. Optimizing energy efficiency in operating built environment assets through building information modeling: a case study: <http://orca.cf.ac.uk/103544/1/energies-10-01167.pdf>

Bits y bytes para ahorros de CO₂

- PWC. (06 de 2016). *Price Waterhouse Coopers*. Blockchain - Chance für Energieverbraucher?: <https://www.pwc.de/de/energiewirtschaft/blockchain-chance-fuer-energieverbraucher.pdf>
- ReStore. (2018). *Minerals and Cement*. <https://restore.energy/en/references/minerals-cement>
- Schellhuber, H. J., Rahmstorf, S., & Winkelmann, R. (2016). Why the right climate target was agreed in Paris. *Nature Climate Change*, 649-653.
- SENER. (05 de 2016b). *Secretaría de Energía*. Redes Eléctricas Inteligentes: [http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/90007/Programa de Redes Elctricas Inteligentes_09_05_16.pdf](http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/90007/Programa_de_Red_Elctricas_Inteligentes_09_05_16.pdf)
- SENER. (11 de 2017a). *Secretaría de Energía*. Anuncian SENER y CENACE, resultados preliminares de la Subasta de Largo Plazo de 2017: <https://www.gob.mx/sener/prensa/anuncian-sener-y-cenace-resultados-preliminares-de-la-subasta-de-largo-plazo-de-2017>
- SENER. (09 de 2017b). *Secretaría de Energía*. Programa de Redes Eléctricas Inteligentes: <https://www.gob.mx/sener/documentos/programa-de-redes-electricas-inteligentes-121753>
- SENER. (2017c). *Sistema de Información Energética*. Precios medios de energía eléctrica por tarifa: <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&subAction=applyOptions>
- SENER-SIE. (2016). *Secretaría de Energía*. Sistema de Información Energética: <http://sie.energia.gob.mx>
- SENER-SIE. (2016). *Secretaría de Energía: Sistema de Información Energética*. Balance Nacional de Energía: Consumo final de energía por sector: <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvequa=IE7C02>
- Smappee. (2018). *Monitores de energía Smappee*. https://www.smappee.com/eu_es/home?l=es_MX
- Stromstunde. (10 de 2016). *GrünStromJetons machen den Ökostromverbrauch sichtbar*. <http://jetons.stromstunde.de/pressemitteilung/launch>
- Swytch. (2018). Von <https://swytch.io/>
- Tado. (2018). *Tado*. Climatización inteligente: <https://www.tado.com/es/>
- Tennet. (06 2017). *Tennet unlocks distributed flexibility via blockchain*. Von <https://www.tennet.eu/news/detail/tennet-unlocks-distributed-flexibility-via-blockchain/>
- The Mobility House. (2018). *The Mobility House supports Groupe Renault in realizing the first smart electric ecosystem on Porto Santo Island*. Von https://www.mobilityhouse.com/int_en/magazine/press-releases/the-mobility-house-groupe-renault-realizing-first-smart-electric-ecosystem-porto-santo-island.html
- UBA. (03 de 2018). *Umweltbundesamt*. Indicator: GHG emissions avoided through the use of renewables: <https://www.umweltbundesamt.de/en/indicator-ghg-emissions-avoided-through-the-use-of>
- UNFCCC. (1992). *United Nations Framework convention on climate change*. Von Art. 1, Definitions: https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf
- WEF. (14 de 01 de 2016). *World Economic Forum*. The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond: <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond/>

Bits y bytes para ahorros de CO₂

ZVEI. (08 de 2017). *Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie*. Digitalisierung und Energieeffizienz:

https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2017/August/Digitalisierung_und_Energieeffizienz/Digitalisierung-und-Energieeffizienz.pdf