

Contribución del transporte ferroviario subterráneo a la sostenibilidad de las ciudades

Diseñado como una infraestructura para liberar la congestión de tráfico y permitir una movilidad masiva de la población, el metro lleva recorriendo los subterráneos de los grandes núcleos urbanos desde la segunda mitad del siglo XIX. El proyecto europeo MyRailS, en el que participa Metro de Madrid, tiene como objetivo desarrollar la infraestructura metrológica para la implementación de una gestión energéticamente eficiente de los sistemas ferroviarios y subterráneos europeos



Tren estacionado en una estación de Metro de Madrid. Foto: Shutterstock.

Marita Morcillo

En la actualidad, con más de doscientas redes de metro en todo el mundo, este medio de transporte se ha convertido en una pieza clave para abordar los grandes desafíos de las ciudades sostenibles: reduce el tráfico rodado, conecta a las personas y contribuye a que en las calles respiremos un aire de mejor calidad, en línea con los objetivos medioambientales para luchar contra la crisis climática.

El metro y la Agenda 2030

En 2015, la Asamblea General de la ONU adoptó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, un plan de acción que contempla 17 objetivos y 169 metas a favor de las personas, el planeta y la prosperidad.

Aunque todos los ODS están interconectados, son dos, el 3 y el 11, los que están íntimamente ligados con la sostenibilidad de las ciudades.

En concreto, el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 3 se refiere a Salud y Bienestar y, dentro de este, la Meta 3.9 pretende reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo. Otra de sus metas es garantizar que todos los ciudadanos tengan acceso a sistemas de transportes seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos.

Por su parte, el ODS número 11 "Ciudades y Comunidades Sostenibles", tiene entre sus finalidades la de "reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo".

El pasado 7 de septiembre, en su mensaje con motivo del Día Internacional del Aire Limpio por un Cielo Azul, el se-

cretario de Naciones Unidas, António Guterres, explicó que nueve de cada diez personas respiran aire contaminado, situación que provoca anualmente siete millones de muertes prematuras, e indicó que esta cifra de fallecidos podría duplicarse de aquí a 2050 si no se tomaban las medidas necesarias para evitarlo.

Además, según datos de la ONU, más del 50% de la población mundial vive actualmente en zonas urbanas y, de seguir con el actual ritmo de crecimiento, en 2050 esta cifra habrá aumentado a 6.500 millones de personas, o lo que es lo mismo, dos tercios de la humanidad vivirá en ciudades.

En este contexto, la calidad del aire y la salud de la sociedad suponen un reto para las ciudades sostenibles. Es en este punto, donde el ODS 3 "Salud y bienestar" entronca con el ODS 11 "Ciudades y Comunidades Sostenibles".



Las instalaciones de ventilación pueden llegar a suponer el 40% del consumo energético del metro. Gracias al sistema de gestión inteligente, el ahorro energético es del 25% y se evita la emisión de 93 toneladas de CO₂ al año.

La superpoblación de los núcleos urbanos incrementa el número de desplazamientos por carretera, necesita mayor cantidad de edificios para vivir, trabajar o descansar y, como consecuencia, aumentan los consumos energéticos, una combinación de factores que merma la calidad del aire y la salud de las personas, especialmente en zonas urbanas que se encuentran en países en desarrollo, donde, según la ONU, se superan los niveles de contaminación atmosférica establecidos en las directrices sobre calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud.

En este escenario, el transporte público se presenta como una alternativa para afrontar los retos de las ciudades sostenibles y, entre todos los tipos, es el metro el que mejor cumple los ODS de la Agenda 2030. Un medio de desplazamiento rápido, asequible y seguro que, propulsado por la electricidad, recorre el subsuelo de las grandes poblaciones trasladando cada día a millones de viajeros, todo ello con bajas emisiones contaminantes.

Inversión eficaz a largo plazo

Según la Unión Internacional de Transportes Públicos (UITP), en 2017, los metros transportaron aproximadamente 53 mil millones de pasajeros en 178 ciudades. Considerando una ocupación promedio de 1,3 pasajeros por automóvil privado, los metros eliminan el equivalente a 133 millones de automóviles de las calles de las ciudades todos los días. Atendiendo a estos conceptos, el metro es un compromiso y una inversión eficaz a largo plazo para ofrecer ciudades sostenibles, resilientes e inteligentes.

Ingenierías subterráneas

Universidades, centros tecnológicos y empresas de ingeniería han creado todo un ecosistema multidisciplinar de investigación y desarrollo encaminado a superar los desafíos que plantea el cumplimiento de los ODS en el sector ferroviario subterráneo. En concreto, la previsión y la audacia en el campo de la ingeniería han encontrado su plasmación en este medio de transporte. Este esfuerzo investigador y tecnológico ha impulsado grandes avances que han entrado a formar parte

de las estrategias de sostenibilidad implantadas en el metro de muchas urbes en todo el mundo.

En 2013, el National Research Council (NRC), a solicitud de la National Science Foundation (NSF), llevó a cabo un estudio para identificar la investigación necesaria en el desarrollo de un metro sostenible en entornos urbanos y destacar el papel de la ingeniería subterránea.

El estudio, titulado "Ingeniería subterránea para el desarrollo urbano sostenible", concluyó que la construcción de las redes de metro y la necesidad de maximizar aspectos como su seguridad, la resiliencia, la escalabilidad o la eficiencia energética, entre otros, han puesto en alza el papel de los distintos campos de la ingeniería que intervienen en todo el ciclo de vida del subterráneo, desde la planificación y el diseño hasta el mantenimiento de las instalaciones.

Desde la electrificación de las locomotoras en las primeras décadas del siglo XX, eliminando los humos provocados por las primeras máquinas propulsadas por carbón o diésel, hasta la



En 2015 se implementó un sistema de recuperación de energía eléctrica, que permite un ahorro equivalente al consumo de, aproximadamente, 1.000 personas al año en la Comunidad de Madrid.

implementación de la digitalización o la inteligencia artificial, la ingeniería ha sido crucial para que las líneas de metro, ya de por sí sostenibles, se hayan convertido en esenciales a la hora de planificar y diseñar ciudades respetuosas con la salud de la sociedad y del medio ambiente.

Viajando por el planeta encontramos 219 ciudades que cuentan con un sistema de transporte ferroviario subterráneo, según los datos de la UITP correspondientes a julio de 2020, y en todos ellos podemos encontrar avances tecnológicos para reducir el impacto medioambiental. Sin irnos muy lejos, en España encontramos modelos que se han convertido en referentes de sostenibilidad a nivel internacional, como el Metro de Madrid, donde desde 2012 se está llevando a cabo una serie de actuaciones de ahorro y eficiencia energética que han contribuido en gran medida a mejorar la salud ambiental no sólo de la capital sino de toda la Comunidad de Madrid.

Metro de Madrid, referente de sostenibilidad

Obra de los ingenieros Otamendi, Echarte y Mendoza, Metro de Madrid nació en 1919 con la misión de establecer comunicaciones económicas y rápidas en una ciudad creciente, objetivos que siguen estando presentes un siglo después. Sin saberlo entonces, Metro de Madrid nació con la sostenibilidad en su ADN, llegando a nuestros días como una com-

pañía firmemente comprometida con su entorno, con la sociedad y con el medio ambiente.

Como firmante del Pacto Mundial de Naciones Unidas, la compañía pública Metro de Madrid ha diseñado una política de Responsabilidad Corporativa articulada en torno a los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenibles establecidos por la ONU para cumplir los retos de la Agenda 2030.

En un marco de prestación de servicio público de viajeros, Metro de Madrid asume su política de Responsabilidad Corporativa apostando por el progreso económico y el desarrollo social y medioambiental, de ahí que desarrolle numerosos proyectos que contribuyen a mejorar la sostenibilidad no sólo de la compañía, sino también de Madrid y de los municipios a los que da servicio.

Planes de Ahorro y Eficiencia Energética

El Metro de Madrid ocupa el noveno puesto en el ranking mundial de longitud, con 294 kilómetros de vías que llegan hasta 12 municipios. Cada día lo utilizan 1,74 millones de pasajeros, lo que supone 626 millones de viajes al año. Dispone de 301 estaciones, 352 vestíbulos, 1.699 escaleras mecánicas, 515 ascensores y 30 pasillos y rampas rodantes. Con esta infraestructura, el consumo energético alcanzó 713.218.827 kWh/año en 2012, año en el que se implantó

el Plan de Ahorro Energético 2012-2017, con el que se consiguió en cinco años una reducción del 25%.

El PAE 2012-2017 permitió intervenir de forma global sobre todos los elementos del sistema ferroviario y crear sinergias entre el material móvil, las instalaciones, la distribución y la regeneración de energía para conseguir mayores beneficios.

Desde entonces, se han llevado a cabo numerosas iniciativas innovadoras para convertirse en uno de los metros más sostenibles del mundo, con un consumo energético un 50% inferior a la media de otros grandes metros.

Además de adaptar el 100% de su sistema de iluminación a la tecnología LED o de apostar por el uso de energías renovables, ya sea instalando paneles solares o adquiriendo electricidad con origen renovable certificado por la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, Metro de Madrid ha implantado avanzadas tecnologías que permiten recuperar el calor del subsuelo o aprovechar la energía producida por el frenado de los trenes. Hay que destacar que también ha impulsado y ha servido como entorno de experimentación para iniciativas de investigación, entre las que cabe destacar un proyecto para convertir el viento de los túneles en energía eólica.

Celdas reversibles o energía de frenado

Las celdas reversibles son unos equipos eléctricos que permiten extraer la energía generada en el frenado de los trenes y reutilizarla en servicios auxiliares de estaciones o en otro tipo de instalaciones, como máquinas expendedoras, luminarias, escaleras mecánicas o ventiladores.

Esta tecnología fue implantada de forma experimental en la estación Campo de las Naciones (Línea 8) durante un año, entre 2015 y 2016. Con una celda de 2 MW, la energía recuperada durante ese periodo se situó en torno a 1 GWh.

Los resultados fueron tan satisfactorios, que la empresa pública contrató en 2018 el suministro y la instalación de cuatro nuevos equipos recuperadores de energía, actuación que supuso una inversión de 1,2 millones de euros.

Dos años después, el suburbano ya cuenta con tres instalaciones operativas en las estaciones de La Peseta (línea 11), La Moraleja (línea 10B) y Hospital de Móstoles (línea 12). En agosto de 2021 ya estaba trabajando para que la



Prototipo de aerogenerador que, instalado en los conductos de ventilación, convierte los flujos de aire en energía eléctrica.

cuarta, en la estación de Barrio del Puerto (línea 7B), comenzara el periodo de pruebas con el objetivo de ajustar la instalación y proceder a su puesta en marcha definitiva.

El uso de las celdas reversibles implica un mayor ahorro, así como una menor contaminación y emisiones de CO_2 , mejorando la calidad del medio ambiente. Por otra parte, la recuperación de energía de frenado evita que se incremente la temperatura ambiente en túneles y estaciones, aumentando el confort para los usuarios y reduciendo los recursos destinados a ventilación y climatización.

El proyecto de las celdas reversibles en Metro de Madrid está sirviendo como banco de pruebas a la iniciativa de europea de investigación MyRailS, que significa "Metrología para la gestión inteligente de la energía en los sistemas ferroviarios eléctricos", financiada por el programa Horizon 2020. Con un presupuesto de 2,5 millones de euros, el objetivo de MyRailS es desarrollar un marco metrológico y una infraestructura de medición para respaldar la adopción de tecnologías energéticamente eficientes en el sistema ferroviario y subterráneo europeo. Metro de Madrid, que participa en el proyecto, está brindando la oportunidad de realizar mediciones para evaluar costos y beneficios en términos de acciones futuras.

Ventilación inteligente

Las instalaciones de ventilación pueden llegar a suponer el 40% del consumo

energético de las estaciones. Dentro del Plan de Ahorro Energético 2012-2017, Metro de Madrid puso en marcha en 2013 un nuevo sistema de ventilación basado en la técnica del free-cooling o enfriamiento gratuito, consistente en la reprogramación informática de los equipos en el interior de los túneles para se pusieran en marcha cuando la temperatura fuera más adecuada, y el consumo energético más económico, manteniendo la salubridad y la calidad del aire en túneles y estaciones.

Previamente, la temperatura de los túneles había ascendido un promedio de $3\text{ }^\circ\text{C}$ debido a las instalaciones de aire acondicionado en los trenes que, con un aire ya caliente, necesitaban consumir todavía más energía para refrigerar, agravando el problema.

Esta técnica extrae y filtra el aire del exterior para enfriar el metro, evitando la recirculación del aire caliente de retorno en los túneles. Al disminuir la temperatura de estos mediante el free-cooling, los trenes necesitan menos cantidad de energía para su refrigeración.

Como complemento a esta medida, en 2017 entró en funcionamiento un sistema de gestión inteligente de ventilación (GIV), que proporcionó un ahorro de entre el 15% y el 20% en el consumo energético de las estaciones.

El GIV es un sistema de inteligencia artificial basado en un algoritmo adaptativo que permite controlar de forma individualizada cada ventilador, teniendo en cuenta diversos criterios y variables,

como las características técnicas de los trenes que circulan por la red, el número de viajeros, la temperatura del aire o las tarifas eléctricas.

La monitorización y el control remoto del sistema permiten automatizar los procesos y facilitan el mantenimiento de las máquinas, optimizando el funcionamiento de los equipos de ventilación. De esta forma, aumenta el confort de los viajeros, con un menor coste energético y con un impacto medioambiental inferior, ya que se reducen las emisiones de CO_2 en 93 toneladas al año.

Proyecto de flujos de aire para generar energía eléctrica

En 2016, la empresa pública que gestiona el metro madrileño firmó un acuerdo de colaboración con una start up española para llevar a cabo un proyecto de investigación cuyo objetivo era desarrollar un prototipo de aerogeneradores que, instalados en conductos de ventilación, estaciones y túneles, pudieran producir energía eléctrica aprovechando las corrientes de aire generadas en el suburbano.

Se trataba de una tecnología escalable, flexible y adaptable a cualquier superficie, que no necesitaba estudios de impacto medioambiental ni grandes infraestructuras para su implantación. Los responsables del proyecto calcularon que con 100.000 aerogeneradores se podrían producir 250 kW al día.

La idea fue tan disruptiva, que en 2016 fue galardonada en los premios de la asociación Madrid Subterra, junto con otros 11 proyectos innovadores para la exploración y explotación del subsuelo urbano. En 2018, la start up recibió una subvención estatal para desarrollar un segundo prototipo más avanzado y ligero que el anterior, y recibió varias ofertas para implantar su tecnología en el metro de otras ciudades del mundo.

No están aquí todas las innovaciones tecnológicas que Metro de Madrid ha implantado en su siglo de historia, pero sí las más recientes para reducir los consumos energéticos y reducir las emisiones contaminantes. Los ejemplos se suceden en casi todas las subterráneos del mundo, desde los más antiguos, como el de Londres, que fue inaugurado en 1863, hasta los más recientes. Todos ellos demuestran que los servicios urbanos bajo tierra pueden ser diseñados para maximizar su contribución a las ciudades sostenibles.