

ANEJO Nº 16. ESTUDIO ENERGÉTICO

TÍTULO
ESTUDIO INFORMATIVO DE AMPLIACIÓN SUR DE LA LÍNEA 11 DEL METRO DE MADRID

DOCUMENTO
ANEJO Nº 16. ESTUDIO ENERGÉTICO

CONTROL DE EDICIONES		
VERSIÓN	FECHA	OBSERVACIONES
1.0	10/09/2025	1ª Edición
2.0	17/10/2025	2ª Edición (Tras Supervisión)
3.0		

ANEJO Nº 16. ESTUDIO ENERGÉTICO

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS	1
3	EVALUACION SISTEMAS CONSUMIDORES DE ENERGIA EN LAS ESTACIONES DE METRO.1	1
3.1	SISTEMAS DE ALUMBRADO	2
3.1.1	<i>Estimación consumo energético debido a los sistemas de iluminación</i>	<i>3</i>
3.2	SISTEMAS DE VENTILACIÓN.....	5
3.2.1	<i>Estimación consumo energético debido a los sistemas de ventilación</i>	<i>5</i>
3.3	SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN	8
3.3.1	<i>Espacios a climatizar.....</i>	<i>9</i>
3.3.2	<i>Estimación consumo energético debido a los sistemas de climatización en las estaciones de metro.....</i>	<i>9</i>
3.4	SISTEMAS DE TRANSPORTE VERTICAL.....	10
3.4.1	<i>Estimación consumo energético debido a los sistemas de transporte vertical en las estaciones de metro.....</i>	<i>11</i>
4	RESUMEN RESULTADOS OBTENIDOS	11
5	MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO APORTADAS.....	12
5.1	MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO ADOPTADAS EN LOS SISTEMAS DE VENTILACIÓN Y CLIMATIZACIÓN.....	12
5.2	EFICIENCIA ENERGÉTICA EN ILUMINACIÓN.....	12
5.3	MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO EN LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE VERTICAL .	12
5.4	MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO EN LOS SISTEMAS DE TRACCIÓN	12
5.5	GESTIÓN DE LA ENERGÍA	15
6	CONCLUSIONES	15

INDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1 - MAPA Y DATOS DE ILUMINACIÓN EN TÚNEL 4

ILUSTRACIÓN 2 - POSIBILIDAD DE ESQUEMA DE PRINCIPIO DE CLIMATIZACIÓN CON POZOS GEOTÉRMICOS. 9

ILUSTRACIÓN 3 - ESQUEMA MOTORES PFU 11

ILUSTRACIÓN 4 - REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE CONSUMO ENERGÉTICO POR TIPOLOGÍA. 11

ILUSTRACIÓN 5 - GRÁFICO AHORRO SISTEMAS TRACCIÓN..... 13

ILUSTRACIÓN 6 - DIAGRAMA DE ENERGÍA CAPTADA DE FRENADAS DE ENERGÍA. 14

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 - Tabla de datos de iluminación Estación Aviación Española (alternativa 1)3

TABLA 2 - Consumo eléctrico ventilación estación7

TABLA 3 - Consumo eléctrico ventiladores pozos de ventilación7

TABLA 4 - Zonas a climatizar estación Aviación española (Alternativa 1)9

TABLA 5 - Potencia eléctrica consumida por la climatización. 10

TABLA 6 - Escaleras mecánicas por alternativa 11

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, Metro de Madrid tiene el compromiso, dentro de sus líneas estratégicas, de lograr la máxima referencia de sostenibilidad en sus tres vertientes: económica, social y medioambiental. El Plan Energético de Metro de Madrid (PAE) y posteriormente el Plan de Eficiencia Energética (PEE), desarrolla un conjunto de 12 acciones, que buscan fomentar el ahorro y la eficiencia energética en la explotación de la red, manteniendo siempre la calidad del servicio.

En los primeros años de implantación de dichas medidas se ha logrado reducir notablemente el consumo energético de sus instalaciones.

Hoy en día Metro de Madrid ha de afrontar nuevos retos económicos debidos al cada vez mayor incremento del coste energético y su variabilidad, por lo que la implantación de las medidas energéticas es una estrategia importante a tener en cuenta en las nuevas extensiones de las líneas de metro de Madrid.

2 OBJETIVOS

El objeto de este documento es mostrar en primer lugar las necesidades energéticas necesarias para la explotación en la ampliación sur de la Línea 11 de Metro de Madrid desde La Fortuna hasta conectar con la Línea 10 en Aviación Española en la alternativa 1, o en Cuatro Vientos en las alternativas 2 y 3.

En el presente documento se estudiarán los principales consumidores de energía en las estaciones de metro, su naturaleza y su implicación en el cómputo general energético identificando aquellos que pudieran ser susceptibles de reducir su consumo mediante el uso de diferentes estrategias.

Con ello se exponen las diferentes soluciones energéticas que sería posible tener en consideración a la hora de ser implantadas, valorando su repercusión en la eficiencia energética de las nuevas estaciones de metro de Madrid de su Línea 11.

Este análisis se centra en el estudio energético de las instalaciones propias de las estaciones, dejando apartado los correspondientes a los sistemas de tracción y de todos aquellos elementos

vinculados al mismo (sistemas de señalización, seguridad, control, gestión, comunicación, etc...); si bien, dada la gran relevancia que tiene el consumo energético en los sistemas de tracción, mencionando en este informe las soluciones que están siendo implantadas según el plan de eficiencia energética de Metro de Madrid.

3 EVALUACION SISTEMAS CONSUMIDORES DE ENERGIA EN LAS ESTACIONES DE METRO

Entre los principales consumidores de energía dentro de una estación de metro hay que mencionar los siguientes:

- **Sistemas de alumbrado**: Dada la naturaleza de las estaciones subterráneas, el alumbrado artificial es uno de los sistemas que más consumo energético asume, debido tanto a las exigencias normativas por mantener unos niveles mínimos de luminancia en los espacios, como a su uso prolongado por la baja posibilidad de conseguir luz natural.
- **Sistemas de ventilación**: Las necesidades de conseguir unos niveles ambientales adecuados en espacios de uso público cuya afluencia de usuarios puede ser importante, y las características propias de las estaciones subterráneas, implica tener que hacer uso de sistemas electromecánicos de ventilación, con aporte de aire exterior y extracción del aire viciado.

Por otro lado, se debe tener en cuenta, todos aquellos sistemas de ventilación necesarios en los numerosos cuartos técnicos que precisa una estación de metro, y que son importantes fuentes de calor (cuartos eléctricos, de comunicaciones, seguridad, etc...).
- **Sistemas de climatización**: Por lo general, la mayor parte de las zonas de uso público en estaciones de metro subterráneas no precisan de unas necesidades de confort térmico tan exigentes como en otros usos cuyos usuarios precisen un mayor tiempo de permanencia. (hay que tener en cuenta que la permanencia media de sus usuarios no es superior a 10 minutos). No obstante, se debe tener en consideración las necesidades de un tratamiento térmico del ambiente en algunos espacios con permanencia de personal o salas técnicas cuyos equipos precisen unas condiciones de temperatura determinadas.
- **Sistemas de transporte vertical**: Los ascensores y, sobre todo, las escaleras mecánicas son equipos que suponen un importante consumo energético en las estaciones de metro subterráneas por su frecuente uso como medio de transporte rápido y seguro.

- **Sistemas de bombeo agua:** Dada la profundidad a la que se encuentran algunas estaciones de metro, es posible encontrarse con niveles freáticos próximos o infiltraciones de agua por el terreno circundante que terminarían inundando las cotas más bajas cuando se producen defectos de impermeabilización; por lo que estas aguas deben ser bombeadas hacia cotas superiores para su desagüe.

3.1 SISTEMAS DE ALUMBRADO

La iluminación en túneles y estaciones debe considerarse como algo prioritario y obligatorio, tanto por las operaciones de mantenimiento como por las evacuaciones en caso de accidente o desalojo de algún tren, con gran densidad de personal.

Sin embargo, el alumbrado artificial de las estaciones de metro subterráneas supone uno de los sistemas que más afecta al consumo energético de las estaciones, por lo que se deberán adoptar las soluciones más eficientes posibles sin menoscabo de las exigencias de iluminación.

Los sistemas de alumbrado deberán cumplir con las condiciones de eficiencia energética mínimas impuestas por la normativa, en concreto por el CTE DB-HE4 en su punto 3:

- Andenes y estaciones de transporte VEEI < 3.0
- Zonas comunes en edificios no residenciales VEEI < 6.0

Donde VEE se expresa en W/m² por cada 100 lux y se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$VEEI = 100 \cdot P / (S \cdot E_m)$$

Donde:

P es la potencia de la lámpara más el equipo auxiliar [W]

S es la superficie iluminada [m²]

E_m es la iluminancia media horizontal mantenida [lux].

Por otro lado, la potencia total de lámparas y equipos auxiliares por superficie iluminada (P_{tot} / S_{tot}) no superará el valor máximo de 10 W/m².

Para el caso de los túneles, donde no es aplicable el CTE, y aunque no existe una normativa aplicable específicamente a los túneles de metro, sí existe una norma comunitaria de calidad

denominada UNE 12464.1. Es una reglamentación de la Unión Europea sobre la iluminación para interiores, que se puede aplicar en la iluminación de túneles.

Para conseguir dichas condiciones se empleará en todos los casos luminarias del tipo LED de alta eficiencia. Los niveles lumínicos mínimos cumplirán con lo estipulado en la norma UNE-EN 12464-1 para estaciones con gran número de pasajeros, manteniendo los niveles con los que actualmente se diseñan las estaciones de Metro de Madrid. De cualquier forma, la eficiencia lumínica de los equipos seleccionados nunca deberá ser inferior a 100 Lm/W.

Siguiendo todas estas premisas, los niveles mínimos de Iluminancia mantenida E_m (lx) incluidos en la norma serán los siguientes:

- Andenes: 200 lx.
- Vestíbulos: 200 lx.
- Cuartos técnicos: 200 lx.
- Cuarto operador: 500 lx
- Taquillas y P.C.L.: 300 lx.
- Pasillos y zonas de tránsito: 100 lx
- Zonas escaleras mecánicas: 150 lx
- Túneles: 30 Lux

La relación entre iluminancia máxima y mínima será por lo general de 40.

La instalación de alumbrado comprenderá, básicamente, cuatro clases de alumbrado totalmente independientes: alumbrado normal, alumbrado de emergencia, alumbrado de socorro y alumbrado de balizamiento.

Tanto en andenes como en vestíbulos se dispondrán de luminarias tipo Led en número y disposición tal que se consigan la calidad de iluminación requerida con la mayor eficiencia posible.

En túneles se dispondrá un conjunto de luminarias estancas tipo Led a lo largo de cada túnel dispuestas cada 10 m. Éstas se actuarán en los periodos que se necesite mantenimiento, si bien deberán mantener en todo momento los niveles de luminancia exigidos para una eventual evacuación en caso de emergencia.

3.1.1 Estimación consumo energético debido a los sistemas de iluminación

El consumo energético y la eficiencia de los sistemas de iluminación depende básicamente de los siguientes factores:

- Potencia instalada de los equipos de iluminación.
- Niveles de luminancia conseguidos en cada espacio.
- Factor de utilización (porcentaje de uso en un día).
- Tiempo de utilización de los sistemas de iluminación.

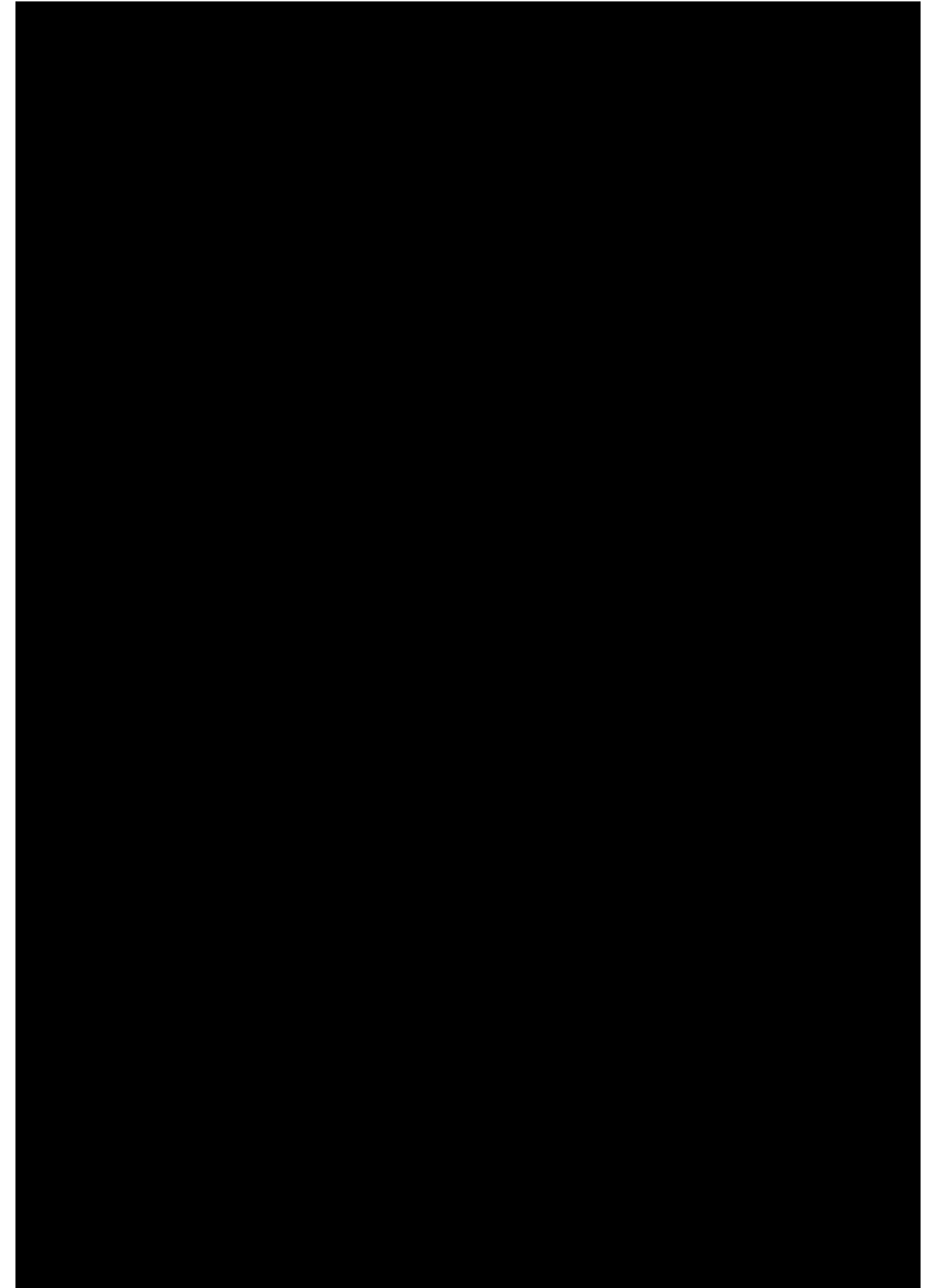
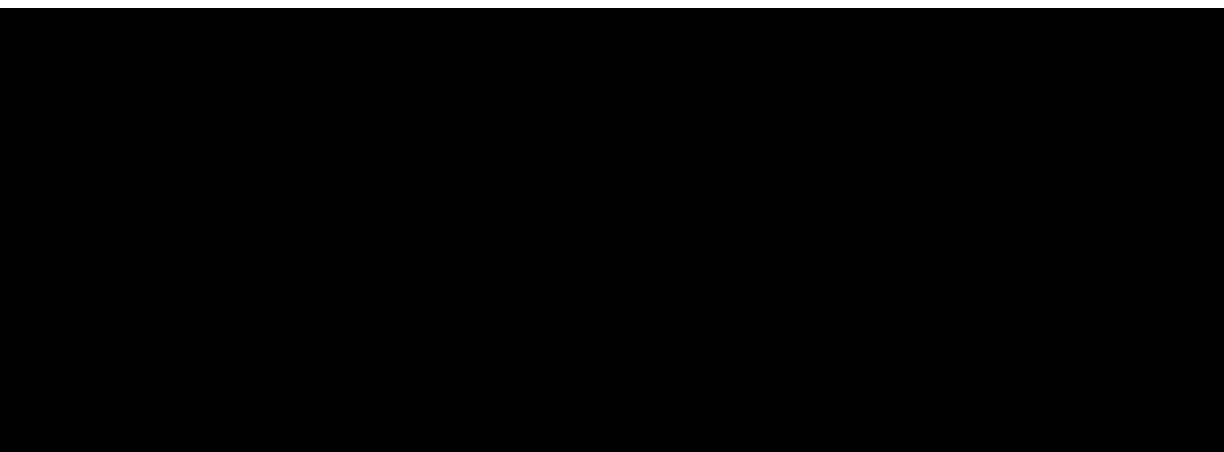
3.1.1.1 Estimación del consumo energético de iluminación en estaciones de metro

Para el estudio del consumo eléctrico estimado en las estaciones, se considera la tipología de cada espacio, los niveles mínimos de luminancia que se desea conseguir, que determinarán la potencia necesaria de los equipos, y su factor de utilización.

El factor de utilización para las zonas de uso público dependerá del horario de funcionamiento de las estaciones. En este caso, suponiendo un horario medio desde 6:00 hasta las 01:30, supone un total de 19h y 30 m de uso diario. Las 4h y 30 m restantes los niveles de iluminación se pueden reducir a 1/3 para las labores de seguridad y mantenimiento; aunque queda a voluntad del personal de mantenimiento el reencender para garantizar la seguridad en tareas de mantenimiento. Teniendo todos estos aspectos en cuenta, se obtiene un factor de utilización en las zonas de uso público de estaciones de 0,87.

En el resto de las estancias se determinan unos factores de utilización que varían dependiendo del uso previsto para ellos: periodos laborales, revisiones periódicas de mantenimiento, etc.

A continuación, se muestran los resultados para la estación tipo que se prevé construir.



Niveles de iluminación en túneles: Durante los periodos de mantenimiento la iluminación media en túneles será de 30 lux, el resto de los periodos se mantendrá de 1 lux y de 5 lux en las salidas de evacuación.

Potencia instalada en la iluminación de túneles: Paso previo al cálculo de la estimación, es necesario obtener una potencia instalada en la iluminación de túneles:

Para establecer la potencia aproximada requerida para la iluminación del túnel se han considerado los siguientes factores:

- Iluminación media: 30 Lux
- Factor de mantenimiento: 0,8
- Posición de luminarias: laterales del túnel a 3,8 m de altura.
- Anchura media del túnel 8,43 m
- Distancia entre luminarias: 10 m
- Potencia eléctrica luminaria: 28,5 W
- Flujo luminoso por luminaria: 4000 Lm

Con todo ello, se realiza una simulación para un tramo de 100 m de túnel, obteniendo los siguientes resultados



Propiedades	\bar{E}	E_{min}	E_{max}	$U_o (g_1)$	g_2	Índice
Superficie de cálculo 1 Iluminancia perpendicular Altura: 0.800 m	55.0 lx	26.2 lx	105 lx	0.48	0.25	CG1

Perfil de uso: Configuración DIALux predeterminada (34.2 Estándar (oficina))

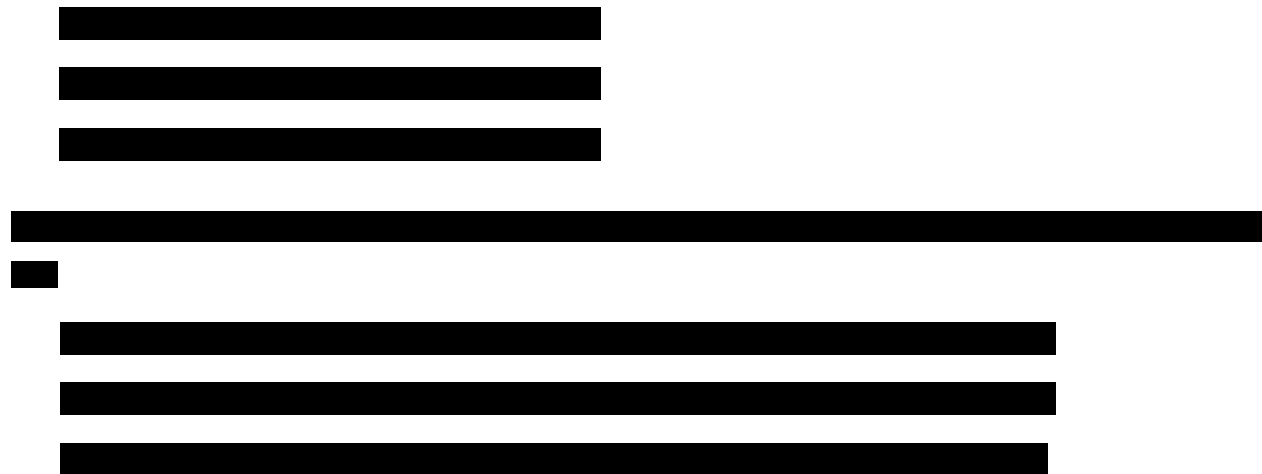
ILUSTRACIÓN 1 - Mapa y datos de iluminación en túnel.

Es decir, por cada 100 m de túnel, se precisaría una potencia de 570W. En ese caso, la potencia necesaria a instalar en todo el tramo de metro sería, para cada alternativa:

3.1.1.2 Estimación del consumo energético por iluminación en túneles

Pese a que el número de luminarias y por tanto la potencia instalada para iluminación de los túneles es importante, su uso se limita a labores de mantenimiento o en casos de una posible evacuación, por lo que su consumo energético se ve afectado por un factor de utilización muy bajo.

En este caso, se tendrá en cuenta el alumbrado de los túneles durante los periodos de mantenimiento, y que deben realizarse fuera del horario de operación. Es decir, durante las 4h y 30 min nocturnos; el resto del tiempo, durante el horario de funcionamiento, se deja una parte de la iluminación de señalización y vías de evacuación. Teniendo en cuenta todo ello, se considera un factor de utilización de 0,18, si bien este valor puede verse reducido al depender de los programas de mantenimiento de túneles.



3.2 SISTEMAS DE VENTILACIÓN

Los sistemas de ventilación en las estaciones y túneles de Metro han de cumplir, en condiciones normales de explotación, lo siguiente:

- Renovación del ambiente interior del sistema, extrayendo el aire viciado (monóxido de carbono, olores, etc.) e introduciendo aire fresco del exterior, siempre que el aire que se capte (generalmente a nivel de calzada) cumpla unos requisitos mínimos de pureza.
- Limitación de la carga térmica en el sistema, producida por los trenes, personas y demás cargas caloríficas (alumbrado, centros de transformación, motores, equipos de climatización aire-aire, etc.).
- Limitación de las corrientes de aire y variaciones de presión provocadas por el efecto pistón que efectúa el tren a su paso.

Existen, asimismo, otros objetivos del "sistema de ventilación" que, en ciertas condiciones, podrían ser aplicables a situaciones de emergencia, tales como son la accesibilidad al túnel y estaciones a través de los pozos de extracción y los de compensación-inmisión y la extracción de humos (derivado de un incendio) o de atmósferas peligrosas (emanaciones de gases combustibles o vapores tóxicos), presurización de escaleras de evacuación, etc... No obstante, dado que su uso no está vinculado a las condiciones de funcionamiento normales, no se tienen en cuenta a la hora de evaluar su consumo energético.

La ventilación de las estaciones se consigue mediante la inyección de aire exterior a través de dos ventiladores, con el caudal suficiente como para mantener unas condiciones ambientales saludables en todos los espacios. El aire exterior es repartido a cada planta a través de dos

conductos verticales que llegan hasta el andén; en su trazado, el flujo de aire es distribuido por todas las plantas, vestíbulos cuartos técnicos y pasillos.

La extracción de aire se realiza a través de los pozos de ventilación situados en los túneles entre cada estación. Cada cámara contiene dos extractores encargados de evacuar el aire viciado de los túneles; su funcionamiento tiene dos misiones principales:

- Por un lado, la de reducir la acumulación de calor que se produce en el interior del túnel debida principalmente al funcionamiento de los vagones (sistemas de refrigeración de motores y sus condensadoras de los equipos de climatización).
- Por otro lado, sirve para despejar de humos y contaminantes los túneles en caso de algún incidente o emergencia, para despejar las vías de evacuación y rescate.

Los caudales que se manejan en cada caso son diferentes, por lo que los sistemas de extracción trabajarán en condiciones diferentes de caudal y por tanto de consumo, siendo muy superior en el caso de una emergencia. En cualquier caso, este estudio únicamente se contempla la situación habitual de explotación.

En este caso, el funcionamiento de los pozos de ventilación es capaz de generar una corriente de arrastre que va desde los andenes de las estaciones aledañas hacia los túneles, de forma que los túneles trabajan siempre en depresión con respecto a los andenes, obligando despejar el aire viciado y el exceso de calor de las zonas habitables.

Por otro lado, se hace necesario inyectar aire exterior al interior de las estaciones y andenes para mantener las condiciones exigidas de renovación de aire en todos los espacios confinados.

3.2.1 Estimación consumo energético debido a los sistemas de ventilación

Uno de los sistemas que más afectan al consumo energético de las estaciones de metro, después de los sistemas de tracción, son los sistemas de ventilación necesarios para mantener unas condiciones ambientales y funcionales adecuadas. Los 891 ventiladores que actualmente tiene instalados Metro de Madrid consumen hasta 80 gigavatios de energía anuales; este dato da idea del importante peso energético que supone estos sistemas y su potencial de ahorro energético.

La ventilación se puede afrontar de tres formas:

- De forma natural**, aprovechando corrientes de convección o diferencias de presión entre los ambientes exteriores e interiores, para lo cual se hace necesario realizar importantes huecos de ventilación con el exterior.

- **De forma artificial**, mediante sistemas electromecánicos para la admisión y extracción del aire interior.
- **De forma mixta**, complementando ambos sistemas.

El grado de confinamiento característico de una estación subterránea y sus túneles, hace necesario que los sistemas de ventilación sean, en mayor o menor medida, apoyado por sistemas electromecánicos, lo que da lugar a este importante gasto energético.

Dentro de los sistemas de ventilación se puede diferenciar entre:

- Sistemas de ventilación destinados a disipar el calor interior.
- Sistemas de ventilación para conseguir los niveles de renovación de aire necesarios para un entorno ambiental adecuado.
- Sistemas de ventilación para el control de humos en caso de incendio.
- Sistemas de ventilación para la compensación de presiones en túneles.

3.2.1.1 Cálculo de las necesidades de ventilación en estaciones:

Se ventilarán los cuartos técnicos eléctricos con un mínimo de 6 renovaciones por hora y teniendo en cuenta las necesidades de ventilación de los equipos que se instalarán en su interior, el resto de los cuartos técnicos se ventilará con un mínimo de 3 renovaciones por hora, todos los cuartos bajo rasante se mantendrán sobre presionados.

Las zonas ocupadas por los viajeros, como vestíbulos, pasillos y andenes, se tendrá en cuenta una calidad del aire IDA3, con un caudal medio de 8 l/s por persona.

Para establecer el caudal máximo de los sistemas de ventilación se han considerado las condiciones de ocupación en hora punta, siendo en estos casos de un valor medio de 180 personas simultáneas en las estaciones y de 230 personas en los intercambiadores.

Siguiendo estos criterios, en estas condiciones se precisa inyectar un caudal de ventilación de al menos 5.184 m³/h para las estaciones y de 6.624 m³/h en intercambiadores

Por otro lado, se deben establecer las condiciones de extracción de aire en vestíbulos y andenes para evitar la acumulación de calor debidas a las cargas internas propias de las personas, alumbrado, equipamiento y durante la permanencia del tren en la estación (hay que tener en cuenta que uno de los factores que más contribuyen en el calentamiento de los andenes son las salidas de ventilación y condensadoras de los sistemas de climatización de los vagones). Si bien,

estos factores son muy variables y depende sobre todo de las frecuencias de los trenes, la ocupación de los andenes y la época del año, se pueden basar en estimaciones que oscilan entre 13.000 W y 23.000 W de carga térmica por planta de andén.

El caudal necesario para disipar el calor interior viene dado por la siguiente ecuación:

$$Q_a = \frac{P_T}{1,16 \cdot \Delta T}$$

Donde:

Qa es el caudal de aire que se desea extraer (m³/s),

Pt es la carga térmica para disipar (kW),

ΔT es el aumento permitido de la temperatura del aire ambiente (°C).

Siguiendo todos estos criterios, se necesitaría un caudal de extracción de aire entre 40.000 m³/h y 80.000 m³/h, por estación.

Equipamiento instalado en salas de estación (por sala):

- 2 Ventiladores axiales Ø 1.100: 45.000 m³/h - 450 Pa – 20,0 kW, asociados a un variador de frecuencia. Ejecución mural.

El caudal de ventilación se regulará automáticamente en función de la concentración de CO₂ interior y mediante sondas de temperatura y CO₂, redundando en la eficiencia y ahorro energético. Para ello, todos los motores de los ventiladores contarán con variadores de velocidad electrónicos.

3.2.1.2 Consumo energético ventilación en estaciones de metro

Con la instalación de variadores de frecuencia, se pretende conseguir un ahorro energético mayor que con un ventilador a dos velocidades, puesto que permite adaptar el giro del ventilador y por tanto el caudal a la demanda real.

Para poder estimar un consumo de energía para la ventilación en túneles, se parte de la base del uso de un ventilador de dos velocidades, con un 60% del tiempo el funcionamiento del ventilador con un régimen de giro bajo y el 40% restante en su régimen más alto. Esta distribución resulta en un consumo de 164.031 kWh/año por estación, como se puede ver en la tabla 2.

TABLA 2 - CONSUMO ELÉCTRICO VENTILACIÓN ESTACIÓN

Ventiladores estaciones					
Pot. (por velocidad) kW	Horas año	Coef. Horas año	Ventiladores (ud)	coef. horas día	Energía consumida (kWh)
4,5	8.760	0,6	2	0,875	41.391
20	8.760	0,4	2	0,875	122.640
					164.031

Para poder calcular un consumo de energía, derivado de la anterior tabla, pero empleando un variador de frecuencia, se parte del principio por el cual, una reducción de la frecuencia produce una reducción de la velocidad de giro del motor, y por ende de la energía consumida. Dicha reducción de energía, se podrá cifrar en un 25% de ahorro, valor habitual de este tipo de instalaciones, lo que dejaría el consumo de energía total en 123.023 kWh/año por cada ventilador

3.2.1.3 Cálculo de las necesidades de ventilación en túneles

Los pozos de ventilación Inter estaciones se dimensionan para el caso más desfavorable que se da cuando es necesario despejar de humo y contaminantes el túnel en caso de una emergencia.

En su uso habitual, estos ventiladores se encargarán de despejar el calor procedente de los vagones en su tránsito por el túnel (sobre todo de los sistemas de climatización y refrigeración de motores), así como evacuar el aire de los andenes adyacentes.

Así, cada pozo de ventilación estará dotado de dos ventiladores con las siguientes características:

- 2 ventiladores axiales Ø 1.800 mm 240.000 m³/h- 600 Pa - 73 kW. Asociados a variador de frecuencia. Clase térmica 300 °C / 2h.

3.2.1.4 Consumo energético ventilación de túneles:

El consumo energético de un sistema de ventilación electromecánico depende principalmente de cuatro factores:

- Caudal de impulsión
- Presión disponible
- Rendimientos eléctrico y mecánico del equipo de ventilación.
- El tiempo de funcionamiento del sistema de ventilación.

La cantidad de energía que se debe consumir para poder desplazar el caudal de aire debido a

los sistemas de ventilación y extracción se puede evaluar aproximadamente en función de los parámetros anteriores, aplicando la siguiente ecuación que los relaciona:

$$E_v = P \cdot h$$

Donde:

Ev es la energía total consumida al año en kWh/año

P = Potencia del ventilador en kW

h = número de horas de funcionamiento al año

Para obtener un valor de energía consumido anual se parte de ventiladores con dos velocidades, puesto que la aplicación de variadores de frecuencia podría dar infinitas casuísticas.

Para la obtención de este valor, se parte de la siguiente situación:

- 1) ventiladores trabajan con un régimen de funcionamiento elevado en periodo estival (caudal de 360.000 m³/h durante 3 meses),
- 2) Los ventiladores trabajan a régimen bajo durante el resto del año (caudal de 180.000 m³/h)

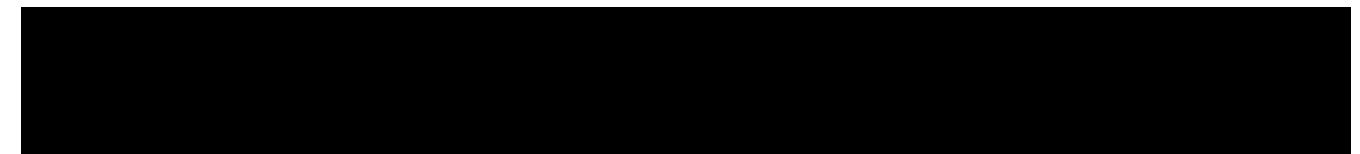
El consumo anual total bajo estas condiciones se estima en: 472.602 kWh/año por pozo de ventilación. Paso seguido, se adjunta la tabla de cálculo del consumo energético de los ventiladores por cada pozo.

TABLA 3 - CONSUMO ELÉCTRICO VENTILADORES POZOS DE VENTILACIÓN

Ventiladores pozos ventilación						
Pot. Vent. (por velocidad) kW	Horas año	Coef. Horas año	nº ventiladores	nº horas día	nº de pozos	Energía consumida (kWh/año)
31	8.760	0,75	2	0,65	1	264.771
73	8.760	0,25	2	0,65	1	207.831
						472.602

Aplicando el mismo criterio en el consumo correspondiente a estos ventiladores que en los ventiladores propios de la estación, es decir, aplicar un variador de frecuencia para reducir el consumo eléctrico, con idénticos ahorros porcentuales del 25 %, se obtiene que la energía total requerida por cada pozo de ventilación sería de 354.451 kWh/año.

Por lo tanto, los consumos de las diferentes alternativas quedarán como siguen:



3.3 SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN

Si bien el volumen de los espacios a climatizar, en las estaciones de metro no son importantes, y se limitan a todos aquellos cuartos técnicos, vestuarios/aseos y espacios de trabajo, que precisan unas condiciones térmicas adecuadas, se buscarán sistemas de climatización lo más eficientes posibles. Siguiendo esta premisa, hoy en día, el uso de la aerotermia proporciona las suficientes ventajas.

Algunas dependencias técnicas, como cuartos de comunicaciones, enclavamientos (cuartos de equipamiento de señalización ferroviaria), son muy sensibles a las temperaturas, por lo que se extremará su control y eficiencia.

Dependiendo de las necesidades térmicas de cada estación, la producción térmica general del edificio correrá por cuenta de dos bombas de calor aire-agua de tipo polivalente para la generación tanto de frío como de calor.

Si bien para los usos propios de cada estación las necesidades principales son en mayoría como funcionamiento de refrigeración durante todo el año, se determinará la posibilidad de utilizar sistemas con mayor eficiencia como la geotermia de baja entalpía en casos concretos donde pueda coexistir una demanda tanto de frío como de calor. De esa forma se puede evitar la colmatación térmica del terreno pudiendo ser útil este sistema si se contempla la utilización exterior con otros usuarios de tipología más variable que lo equilibren (proximidad de edificios públicos o venta de este calor a edificios cercanos).

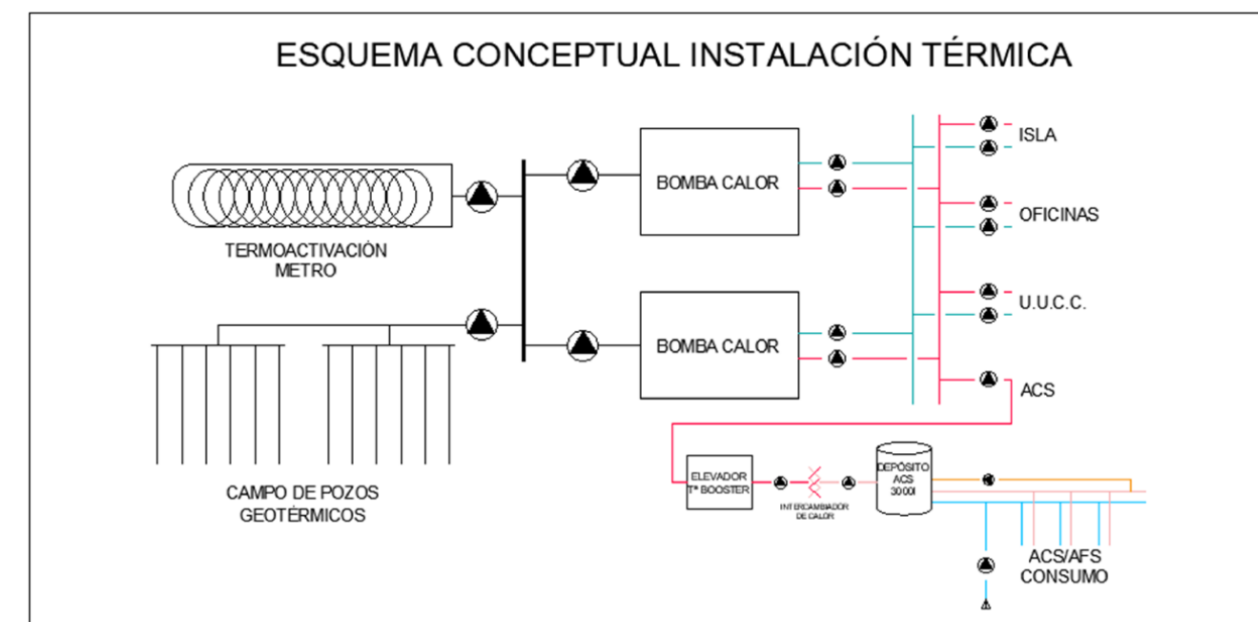


ILUSTRACIÓN 2 - POSIBILIDAD DE ESQUEMA DE PRINCIPIO DE CLIMATIZACIÓN CON POZOS GEOTÉRMICOS.

3.3.1 Espacios a climatizar

Los siguientes espacios estarán dotados de climatización:

Av. Española (Alternativa 1)

TABLA 4 - ZONAS A CLIMATIZAR ESTACIÓN AVIACIÓN ESPAÑOLA (ALTERNATIVA 1)

Zonas a climatizar	
Sala/Cuarto	Área (m ²)
Vestuario M.	11,92
Vestuario F.	18,17
Cuarto operador	21,93
Cabina andén	16,69
Comunicaciones	30,71
Enclavamiento	30,79
Telefonía	30,79
	161,00

Condiciones de diseño de los sistemas de climatización

Las condiciones interiores de diseño que se han tenido en cuenta en el estudio energético para las instalaciones de HVAC en andenes y zonas de circulación, son las siguientes:

Verano: 25°C y 50% H.R.

Invierno: 20°C y 50% H.R.

No obstante, se ha de tener en cuenta que las zonas de uso público (andenes y zonas de circulación) son espacios que no requieren de una climatización exhaustiva sino un atemperado. La experiencia en este tipo de actividades aconseja no tener un excesivo gradiente térmico entre la temperatura ambiente de estos espacios y el ambiente exterior. Será más confortable para los usuarios no tener que modificar su vestimenta (ropa de abrigo en invierno o ropa ligera en verano) durante el tiempo de estancia, que en condiciones normales serán minutos.

Es por esto por lo que las condiciones interiores indicadas serán orientativas, ajustándose en todo momento en pro de una mayor eficiencia y confort para los usuarios.

También se primará, siempre que sea posible, y desde el punto de vista energético, un control de la temperatura interior mediante ventilación exterior

Oficinas administrativas y espacios interiores con permanencia sedentaria de personas:

Se han seguido indicaciones del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios RITE y en el Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo en su anexo III: La temperatura de los locales donde se realicen trabajos sedentarios propios de oficinas o similares estará comprendida entre 21 y 25 °C.

Las salas técnicas con temperatura controlada: dispondrán de un sistema de climatización o ventilación en función de los equipos específicos que confinan según recomendaciones del fabricante. En este caso se toma en el estudio una temperatura media de 20°C.

Equipos de producción térmica: Como se observa, los espacios y superficies que son necesarios climatizar son de tipologías y superficies similares en cada estación, por lo que se adoptará soluciones también equivalentes.

Para dar servicio al 100% de las necesidades de refrigeración y calefacción se ha considerado el uso de dos bombas de calor VRV, condensadas por aire, en funcionamiento escalonado, de 23 kWc / 22 kWf. Pudiendo dar al sistema una potencia total de 46 kW en calor y 44 kW en frío con COP de 3 a 3,5.

Dado que algunos de los espacios a climatizar solo precisan frío, en algunos casos pueden coexistir el uso simultáneo tanto de frío como de calor, en esos casos, se optará por un sistema de distribución de refrigerante a 3 tubos. Este sistema, además de permitir una máxima flexibilidad, mejora la eficiencia energética del sistema al poder transferir el calor residual hacia las estancias que precisan calor.

3.3.2 Estimación consumo energético debido a los sistemas de climatización en las estaciones de metro.

3.3.2.1 Consumo energético climatización estaciones de metro

Considerando los rendimientos energéticos de las bombas de calor geotérmicas, se puede establecer una potencia eléctrica necesaria para los sistemas de climatización de 13 kW para cada estación.

A la hora de estimar el consumo energético anual debido al uso de los sistemas de climatización se han de tener en cuenta lo siguiente:

- Número de horas eficaces de funcionamiento de los equipos de climatización: dependerá del tipo de estancia, así, un espacio de trabajo estará sujeto a un horario programado, mientras que un cuarto técnico deberá mantener constante la temperatura a lo largo de todo el día.
- Potencia eléctrica de los sistemas de climatización.
- Temperatura a la que deben estar los espacios a climatizar: en este caso se toma una temperatura interior de 22°C en invierno y 25°C en verano para los espacios habitables, y de 20°C durante todo el año en cuartos técnicos.
- Pérdidas y ganancias de calor en cada espacio: debido sobre todo a los sistemas de ventilación y a las ganancias de los equipos eléctricos y electrónicos.

Teniendo en cuenta todos estos aspectos, y las experiencias con otras estaciones similares, se puede estimar el consumo eléctrico derivado de la climatización.

El cálculo relativo al clima es prácticamente idéntico en cada estación, debido a que las zonas de uso no varían en área y por tanto no lo hacen en potencia térmica demandada. Por este motivo solamente se estudia una estación tipo como representación de las tres alternativas.

3.4 SISTEMAS DE TRANSPORTE VERTICAL

El transporte vertical por excelencia en los metros de Madrid es la escalera mecánica, pues permite transportar de forma puntual una gran afluencia de personas en cortos periodos de tiempo. Si bien existen otros medios de transporte vertical como ascensores, aunque tienen un uso menos frecuentado.

Escaleras mecánicas: Las escaleras mecánicas han de estar diseñada para soportar un gran tráfico y velocidades de funcionamiento de 0,65 m/s hasta 0,75 m/s, garantizando un alto porcentaje de disponibilidad, minimizando los periodos de mantenimiento y con una alta eficiencia energética.

La norma EN-ISO 25745:2015 en su parte 3, describe las pautas que deben seguir las escaleras mecánicas en cuanto a la medida de su eficiencia energética y su clasificación. Esta norma proporciona:

- Un método para estimar el consumo de energía de las escaleras según una base diaria y otra anual.
- Un método de clasificación energética de las escaleras mecánicas.
- Una guía para reducir el consumo de energía

La eficiencia energética de una escalera mecánica depende de muchos factores, entre ellos su modo de funcionamiento según su carga, debiendo poder acoplarse a la misma en el punto de mayor rendimiento del motor en relación con su curva del par-motor. Para ello se utilizarán sistemas dotados de variadores de frecuencia en lugar de los arrancadores estrella-triángulo.

Han de seguirse además otras estrategias como los sistemas de arranque a demanda (también llamado modo arranque-paro o modo automático), y que deberá activarse solo en aquellos periodos con poca frecuencia de pasajeros ya que las frecuentes paradas y arranques pueden provocar desgastes mecánicos prematuros.

Los principales ahorros con el variador se alcanzan cuando se reduce la velocidad del motor al no haber usuarios sobre la escalera, esta es la conocida velocidad en espera (stand-by-speed), y se puede lograr el óptimo ahorro de energía a través de la reducción del voltaje.

La combinación del sistema start/stop y el stand-by-speed, proporciona el más efectivo ahorro de energía.

En aquellas escaleras mecánicas donde es previsible un tráfico importante de viajeros, es interesante hacer uso de sistemas de regeneración de energía con unidades de retroalimentación de energía (PFU). Estos convertidores se instalan en las escaleras de bajada, y permiten regenerar la energía de frenada, pudiendo reemplazar a las resistencias de frenado.

Tanto el motor como las PFU pueden regenerar hasta un 60% de la energía requerida para la potencia nominal del motor.

La aplicación de estas medidas puede suponer un potencial de ahorro energético del 40%.

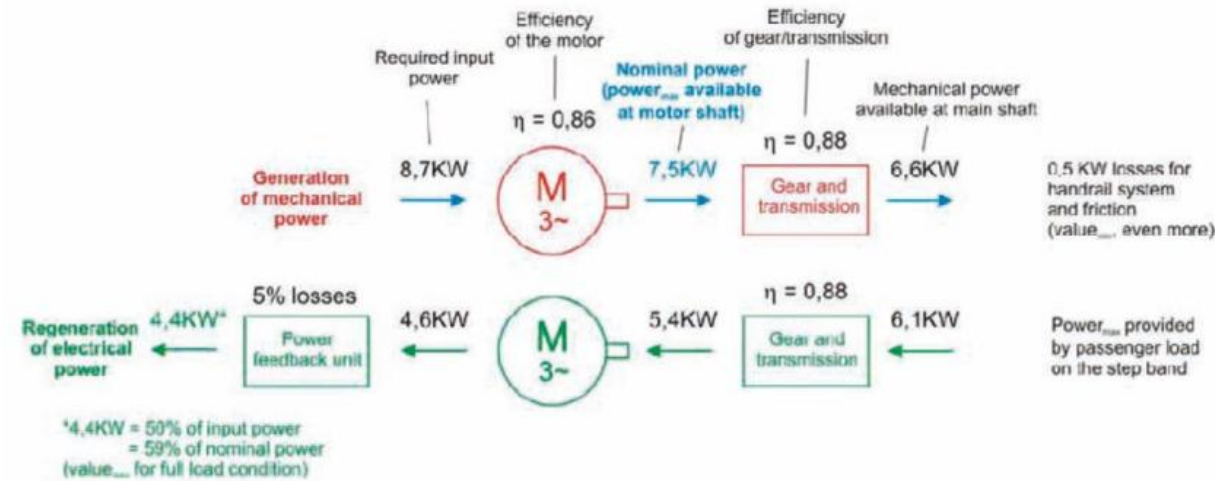


ILUSTRACIÓN 3 - ESQUEMA MOTORES PFU

Ascensores: Si bien los ascensores son elementos de transporte vertical exigidos en espacios públicos, su uso no repercute en gran medida en el consumo energético global de los sistemas de transporte vertical, dado que no permite el transporte rápido del flujo de pasajeros.

3.4.1 Estimación consumo energético debido a los sistemas de transporte vertical en las estaciones de metro

A la hora de estimar el consumo eléctrico de cada estación, se tiene en cuenta:

- El número de sistemas de elevación por cada estación.
- Potencia eléctrica de los equipos.
- Periodos de funcionamiento teniendo en cuenta las curvas de funcionamiento: tiempo neto funcionamiento con carga total, tiempo en modo stand-by y tiempos en modo stop.
- Carga a la que están sometidos, sobre todo en las escaleras mecánicas de subida en los periodos punta.

4 RESUMEN RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se resumen los valores estimados de consumos energéticos debidos a los principales consumidores en toda la nueva línea de Metro.

- Alumbrado estaciones: 91.871,9 kWh/año
- Alumbrado túneles: 29.312,71 kWh/año
- Climatización: 45.832,31 kWh/año
- Ventilación estaciones: 123.023 kWh/año.
- Ventilación túneles: 1.417.806 kWh/año
- Sistemas de transporte vertical: 203.706 kWh/año

Representación consumo energético en tramos objetos de estudio.

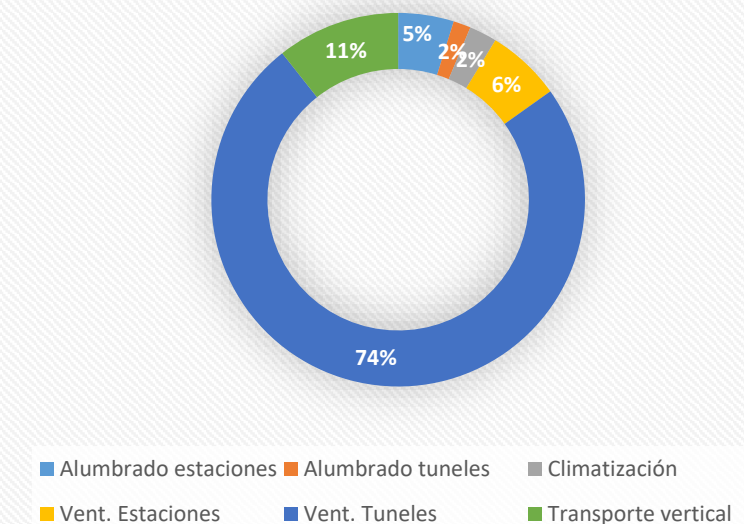


ILUSTRACIÓN 4 - Representación gráfica de consumo energético por tipología.

De la anterior representación gráfica se extrae el gran consumo que representa la ventilación del túnel, siendo en total, un 74% del total de la energía.

5 MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO APORTADAS

5.1 MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO ADOPTADAS EN LOS SISTEMAS DE VENTILACIÓN Y CLIMATIZACIÓN.

Se han adoptado las siguientes medidas a efectos de reducir el consumo energético en los sistemas de climatización y ventilación:

- Los sistemas de ventilación de las zonas climatizadas se equipan con recuperadores de energía del aire de extracción.
- Detectores de CO₂, CO, NO_x y humedad vinculados a las tomas de aire exterior para ajustar la ventilación a las necesidades instantáneas del edificio.
- Parcialización de sistemas por zonas con distinto uso y funcionalidad.
- Parcialización de equipos productores para una mejor adecuación de la producción al perfil de la demanda optimizando su rendimiento.
- Sistemas de bombeo en secundarios con variadores de velocidad.
- Aislamiento térmico de las redes de distribución de agua.
- Ventiladores de alta eficiencia de velocidad variable en la gran mayoría de equipos.
- Circuito fuente para climatización mediante pozos geotérmicos, este sistema de intercambio de calor se utilizará para obtener elevados rendimientos en la producción térmica pudiendo así considerarse como una energía renovable. Asimismo, se utilizará el secundario de la red de climatización como base para el sistema de elevación de temperatura en producción de ACS. Se conseguirá así un ahorro energético adicional recuperando energía calorífica de climatización en épocas de producción de frío.
- Control automático y dinámico de las instalaciones térmicas en función de las temperaturas exteriores.
- Las instalaciones generales serán controladas por un Sistema de Gestión Integral centralizado (BMS) compuesto por procesadores de control con el software necesario para las funciones de regulación y gestión energética.
- A su vez, se deberá poder gestionar de manera individualizada en cada espacio. Las unidades interiores dispondrán de termostato programable. El sistema central estará preparado para contabilizar los consumos de los diferentes usuarios.
- Este sistema dispondrá de un módulo de control de los consumos de cada equipo de la instalación para lo que se incorporarán los correspondientes analizadores de redes a la

instalación posibilitando asimismo el control de la eficiencia de los equipos para realizar acciones de ahorro de energía en función de la diferencia de temperatura entre consigna y retorno.

5.2 EFICIENCIA ENERGÉTICA EN ILUMINACIÓN

Entre las medidas adoptadas para mejorar el rendimiento y la eficiencia energética en los sistemas de alumbrado hay que destacar los siguientes:

- **Uso de tecnología LED:** La tecnología LED, ha revolucionado el sector de la iluminación. Comparadas con las bombillas incandescentes y fluorescentes, las luces LED consumen considerablemente menos energía y tienen una vida útil más larga. Además, ofrecen una mayor flexibilidad en términos de diseño y control de iluminación.
- **Uso de sensores de presencia y de movimiento:** el uso de detectores de presencia y movimiento en aquellos espacios de ocupación ocasional generan un importante ahorro energético al utilizarse la luz artificial únicamente cuando se necesite.
- **Sistemas de regulación de intensidad lumínica:** El uso de regulación lumínica permite reducir el consumo energético en aquellos horarios fuera del uso público (mantenimiento, limpieza, etc...), o en aquellos espacios con posibilidad de disponer de luz natural (accesos exteriores a las estaciones).

5.3 MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO EN LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE VERTICAL

El ahorro energético más efectivo en los sistemas de transporte vertical se obtiene mediante sistemas con variador del par en función de la carga y el empleo combinado de sistemas start/stop y stand-by-speed. Es posible también estudiar sistemas de recuperación de la energía en las escaleras de descenso en aquellas estaciones con un mayor tránsito de viajeros.

5.4 MEDIDAS DE AHORRO ENERGÉTICO EN LOS SISTEMAS DE TRACCIÓN

Explicar, previamente que las alternativas que se estudian, solo la alternativa 1 contaría con

subestación de tracción, mientras que las alternativas 2 y 3 se interconectarían con la subestación existente en la estación de Cuatro Vientos, correspondiente a Línea 10. En cualquier caso, la relevancia del consumo derivado de esta instalación hace que sea un sistema que no se puede obviar.

Siendo cierto que en este estudio no se ha considerado el consumo energético relacionado con los sistemas de tracción, éstos suponen sin duda el mayor peso en el consumo energético de la explotación, llegando al 67% del consumo global de Metro de Madrid. Por ello se considera necesario mencionar las medidas de acción que Metro de Madrid está implantando en sus sistemas de transporte, y que quedan resumidas en su Plan de Ahorro Energético y plan de Eficiencia Energética. Estas medidas han supuesto un ahorro del 24,29% en sus primeros 5 años de implantación. Entre ellas mencionamos las siguientes:

1. Optimización del Modelo de Propulsión del Material Móvil:

Las curvas de tracción del Material Móvil (curvas características) son diseñadas para definir el régimen cinemático del mismo (velocidad y aceleración en función del tiempo)

La energía consumida asociada a cada curva característica puede ser corregida modificando dicho régimen cinemático mediante la definición de nuevas curvas de esfuerzo tracción/freno. Es posible optimizar dichas curvas actuando sobre los tiempos de potencia constante y de la aceleración.

2. Implantación de marchas económicas en conducción automática.

El sistema de conducción automática del Material Móvil, denominado ATO, determina el perfil de velocidades que desarrolla una unidad tren entre dos estaciones, en base a parámetros de tiempo, velocidad distancia perfil y prestaciones de los trenes.

Existen diversas marchas de conducción que determinan el tiempo de recorrido y la conducción entre estaciones. Las diversas marchas (tendida y económicas) gestionan el consumo energético mediante el ajuste de la deceleración y de las velocidades de deriva y remotor.

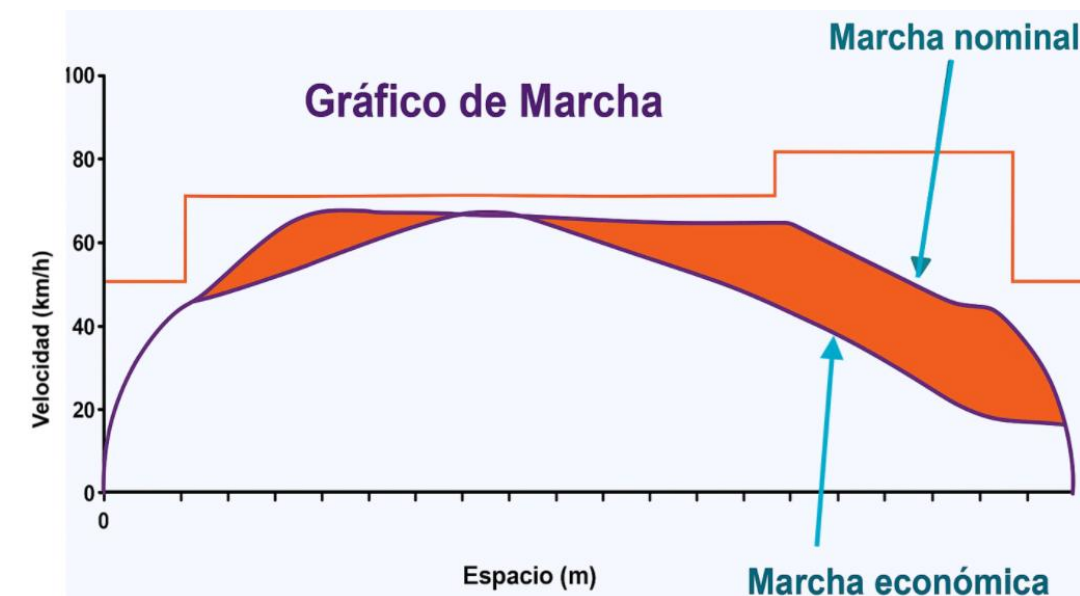


ILUSTRACIÓN 5 - GRÁFICO AHORRO SISTEMAS TRACCIÓN

3. Desconexión de subestaciones eléctricas en hora valle.

Las subestaciones eléctricas proporcionan energía al sistema de transporte (tracción de trenes y servicios auxiliares) y a los sistemas de explotación existentes mientras que los trenes disponen de la capacidad de devolver energía durante la fase de frenado (freno regenerativo) en la que los motores actúan como generadores, devolviendo a la catenaria la energía cinética acumulada. Para devolver la energía, la tensión de regeneración del tren debe superar la tensión de catenaria, por lo que ésta deberá ser lo más baja posible dentro de los márgenes de normativa

La desconexión de determinadas subestaciones eléctricas en hora valle, en función de la tabla de trenes y de la demanda de energía genera una bajada de tensión, siendo ésta más acusada en las proximidades de la subestación desconectada. Esta acción requiere la ejecución de maniobras (apagado/ en la operativa diaria del Puesto de Mando).

4. Reducción de la tensión de salida de subestaciones eléctricas.

Para el óptimo aprovechamiento de la energía regenerada, la tensión en catenaria no debe ser elevada. Los transformadores de tracción son los encargados de reducir la tensión de entrada en la subestación a un valor tal que, una vez rectificado y convertido a corriente continua, permita alimentar a la catenaria a la tensión adecuada. Los transformadores instalados en las subestaciones están equipados con tomas de regulación, que permiten cambiar la relación de transformación y

ajustar el valor de tensión de salida al valor deseado, con un margen de regulación de 5 respecto a la tensión nominal.

Esta acción produce un nuevo reparto de cargas en la línea de catenaria generando una transferencia de energía hacia las subestaciones cercanas a las que se aplica la medida

Además, la energía eléctrica que demanda el Material Móvil fluye desde las subestaciones eléctricas, siendo transportada por la catenaria hasta el tren retornando por los carriles de la vía. Con la instalación de compensaciones, se consigue un mejor aprovechamiento de la energía al disminuir la caída de tensión. Por otro lado, la conexión de las SS/EE en paralelo aseguran la fiabilidad de la instalación mediante un sistema de “arrastrés” ante cualquier incidencia. Esta instalación asegura un aprovechamiento energético entre los diferentes trenes que circulan.

La regeneración en el Material Móvil mediante la reducción de los caminos eléctricos tanto en la catenaria (compensación de positivo) como en el carril (compensación de negativo) entre ambas vías, para encontrar posibles consumidores (trenes y/o subestaciones reversibles), con la consiguiente reducción de pérdidas por caídas de tensión.

Con ello se obtienen los siguientes efectos

- Aumento de la sección efectiva de la línea, reduciendo la resistencia de esta.
- Mayor aprovechamiento de la energía devuelta durante el proceso de frenado del tren, al aumentar el número de caminos posibles hacia potenciales consumidores.

5. Eliminación de imanes de vía:

La línea aérea está dividida en sectores de tracción separados de sus colaterales mediante elementos denominados aisladores de sección, los cuales pueden ser de dos tipos: aisladores de sección con zona neutra y sin zona neutra.

Para mejorar la captación de energía, al paso del tren, por un aislador de sección sin zona neutra existen elementos en la vía, denominados imanes de vía, que inhiben la tracción/frenado regenerativo del Material Móvil.

Los imanes suelen encontrarse en las entradas a las estaciones, momento en el que se produce el frenado, por lo que se impide el correcto aprovechamiento de la totalidad de la energía de frenado regenerativo del Material Móvil.

La modificación de los aisladores de sección y la retirada de los imanes correspondientes nos permite incrementar la ventana de tiempo en la que un tren puede regenerar energía en su proceso de frenado. Esta acción requiere modificaciones en los elementos de la línea aérea y la retirada de equipos en la plataforma de vía.

6. Instalación de subestaciones reversibles.

La energía regenerada por el Material Móvil como consecuencia de su frenado puede ser utilizada por otros trenes, por otras subestaciones o por otras instalaciones de explotación que se alimenten de la red de distribución interna y externa. Inyectar la energía regenerada por el Material Móvil en la red de distribución interna de 15 kV evitando su pérdida en forma de calor y utilizarla para otros consumidores internos (escaleras mecánicas, ascensores, sistemas de ventilación, etc...)

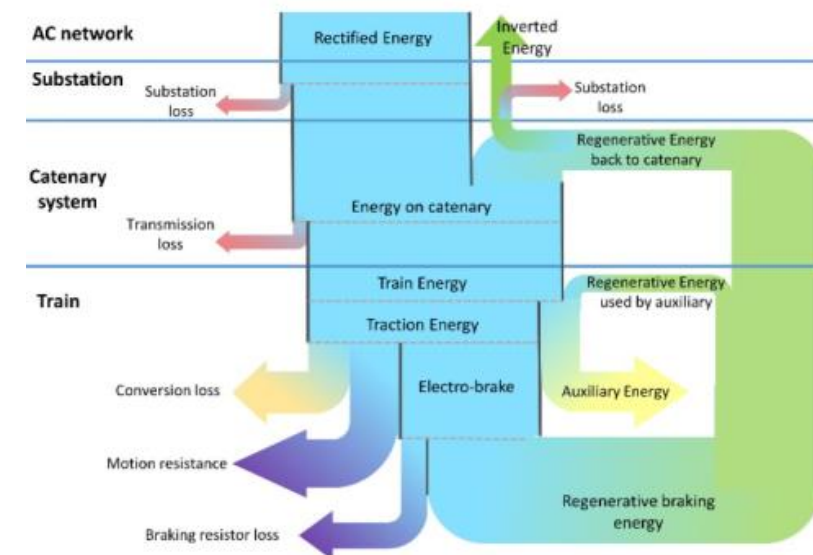


ILUSTRACIÓN 6 - DIAGRAMA DE ENERGÍA CAPTADA DE FRENADAS DE ENERGÍA.

7. Implantación de alumbrado LED en trenes.

El uso de luminarias LED tanto en estaciones como en túneles y vagones de metro permite conseguir ahorros energético superior al 50%, además de optimizar el mantenimiento preventivo al disponer de una mayor vida útil.

8. Optimización de la climatización en el Material Móvil.

Los procesos de climatización del recinto de viajeros del Material Móvil contemplan los modos de funcionamiento de calefacción, ventilación y aire acondicionado. El

modo habitual de funcionamiento se establece mediante una curva de confort en la cual se consideran diversas variables como son la temperatura exterior o la del recinto de viajeros, entre otras.

Esta medida tiene por objetivo optimizar el funcionamiento de los equipos de climatización del material móvil minimizando el consumo energético mediante la modificación de las curvas de enfriamiento dentro de unos rangos prefijados en función del periodo invierno/verano, y conforme a la normativa aplicable y parámetros de confort.

9. Optimización de la ventilación de estaciones y túneles

Empleando estrategias que permitan ventilar cuando el salto térmico entre interior y exterior sea máximo y/o cuando el coste de la energía sea menor, asegurando la salubridad del ambiente.

5.5 GESTIÓN DE LA ENERGÍA

Entre los objetivos primordiales de la gestión energética se deben mencionar los siguientes:

- Conocer dónde y cuánto se consume.
- Recopilar información sobre los consumos de las diferentes instalaciones en tiempo real, en un BIG-DATA, para su posterior uso en programas de inteligencia artificial capaces de distinguir desviaciones y realizar predicciones y avisos de alarma por consumos excesivos.
- Generar acciones para adaptar el consumo a las verdaderas necesidades.

Aprovechamiento de las nuevas tecnologías predictivas y de gestión de la energía basadas en la IA:

- La inteligencia artificial (IA) ha emergido como una herramienta poderosa en muchos ámbitos de la sociedad. Entre estos se encuentra, la optimización del consumo energético mediante la recopilación y análisis de datos. Esto lleva a que el modelo de la IA pueda aprender el comportamiento energético del edificio o infraestructura, ayudando a mejorar el consumo energético y por tanto haciendo la instalación más eficiente.
- La IA puede reducir significativamente el consumo energético de un edificio al optimizar los recursos y detectar áreas de desperdicio. A su vez, la IA puede conducirnos a una reducción de los costos operativos y de mantenimiento a largo plazo.

Entre las aplicaciones de IA en la Gestión Energética se pueden destacar:

Sistemas de Gestión de Edificios (BMS): los BMS utilizan algoritmos de IA para monitorear y controlar sistemas de HVAC, iluminación, y otros sistemas, para optimizar el consumo energético.

Predicción de la demanda: Los modelos de IA pueden predecir la demanda energética de un edificio basándose en factores como el clima, la ocupación y las actividades programadas, permitiendo una gestión más eficiente de los recursos.

Optimización de la Operación: Los algoritmos de IA pueden ajustar automáticamente la operación de equipos y sistemas para minimizar el consumo energético sin comprometer el confort, calidad del aire o la operatividad de los diferentes sistemas.

Detección de Anomalías: Los sistemas de IA pueden identificar anomalías en el consumo energético, como fugas o malfuncionamiento de equipos, permitiendo una respuesta rápida y reduciendo costos de mantenimiento.

Actualmente, Metro de Madrid está implantando un nuevo sistema de gestión inteligente de ventilación en túneles (GIV), este sistema permite controlar de forma individualizada cada ventilador, y cada 8 horas decide la mejor programación, 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; con ello se pueden conseguir ahorros energéticos que pueden suponer el 40% y reducir las emisiones de CO₂.

6 CONCLUSIONES

En este estudio se han ponderado, desde el punto de vista energético, todos aquellos elementos consumidores de energía para las nuevas estaciones de Metro y sus túneles. Con ello, se han identificado aquellos sistemas que más afectan al consumo energético y su potencial de reducción de energía. Entre ellos caben destacar por orden de importancia:

1. Sistema de tracción.
2. Sistema de ventilación de túneles
3. Transporte vertical
4. Ventilación estaciones

5. Alumbrado estaciones
6. Climatización
7. Alumbrado túneles.

Dentro de su estrategia energética, Metro de Madrid está desarrollando e implantando programas de mejora energética en todas sus estaciones y líneas de metro.

En el Plan de ahorro de energía de Metro de Madrid (PAE) y posterior Plan de Eficiencia Energética (PEE), se han establecido una serie de pautas a seguir y que deben ser consideradas en sus nuevas ampliaciones. Dichos planes se centran sobre todo en áreas como la optimización del consumo de tracción y aumento de la regeneración, la implantación de tecnología LED en los sistemas de alumbrado, así como la gestión eficiente e inteligente de la ventilación de estaciones y túneles. La implantación de estas soluciones ha demostrado unos resultados muy satisfactorios y se consideran como una referencia a seguir en el resto de las ampliaciones del Metro de Madrid.

Si bien no suponen una gran repercusión en el cómputo general energético, se han de considerar también las medidas adoptadas para los sistemas de transporte vertical, siendo recomendable seleccionar equipos de la mayor eficiencia energética del mercado, así como la posibilidad del uso de energías renovables como el aprovechamiento de la temperatura del terreno (geotermia de baja entalpía) para los sistemas de climatización propios de las estaciones, o el uso de la energía solar fotovoltaica, si bien este último queda muy limitado dada la baja disponibilidad de superficies exteriores aprovechable.

