

MÁSTER UNIVERSITARIO EN SISTEMAS FERROVIARIOS

16ª PROMOCIÓN



AÑO ACADÉMICO 2017/2018

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**“ESTUDIO DE LA POSIBILIDAD DE APROVECHAMIENTO DE LA
INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA DE LA LÍNEA MADRID-BARCELONA
PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DESTINADA AL
AUTOCONSUMO”**

Autor

Isabel María de la Paz de la Torre

Directores del trabajo

Francisco Paños Mangrané

Joan Saura Serrat

Madrid, Julio 2018

FICHA TÉCNICA

ESTUDIO DE LA POSIBILIDAD DE APROVECHAMIENTO DE LA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA DE LA LÍNEA MADRID-BARCELONA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DESTINADA AL AUTOCONSUMO

Alumno: Isabel María de la Paz de la Torre
Director: Francisco Paños Mangrané
Co-director: Joan Saura Serrat
Programa Cursado: 16ª Promoción del Máster Universitario en Sistemas Ferroviario

Resumen:

Ante la situación actual del gran consumo eléctrico del transporte por ferrocarril y la existencia de grandes explanaciones en desuso a lo largo de la traza de las nuevas líneas de alta velocidad, se decide valorar la posibilidad de poder generar parte de esa energía mediante placas fotovoltaicas colocadas en dicha superficie. El gran índice de radiación solar en España juega un importantísimo papel en este estudio, el cual también se evaluará con especial detenimiento. Otro aspecto a tener muy en cuenta, es el marco regulatorio del autoconsumo energético sin aislamiento de la red existente.

Por tanto, el trabajo consiste en un análisis de las posibilidades de explotación de la plataforma ferroviaria para la implantación de sistemas de generación de energía eléctrica solar fotovoltaica. . En concreto, se estudiarán las posibilidades de utilizar las superficies existentes fuera del gálibo ferroviario sin ninguna finalidad técnica, como son taludes de relleno desmonte, explanaciones o superficies horizontales.

A lo largo del trabajo se realiza una identificación y valoración de la superficie útil, coste de la instalación propuesta, tipo de conexionado de la misma, valor de la potencia nominal instalada que podrá ser inyectada a la red eléctrica interna de ADIF y capacidad de amortización del sistema entre otras tareas.

Como línea de estudio fundamental y aplicación de la idea innovadora se ha considerado la LAV Madrid-Barcelona-Frontera Francesa, en su tramo central entre Madrid y Barcelona.

Alumno:
Isabel M. de la Paz de la Torre



Director:
Francisco Paños Mangrané



Co-director:
Joan Saura Serrat



AGRADECIMIENTOS

En la vida se suele valorar, en mayor o menor medida lo que se tiene, pero casi nunca se suele realizar a la perfección. Este modo de hacerlo sólo acontece cuando todo o parte de ello ya no se encuentra a nuestro alcance, eso es lo que realmente he aprendido a lo largo de todos estos años de formación académica; de ahí mi agradecimiento perseverante y diario a todas las personas que me rodean. También aprendí que los tres valores con los que se puede vencer cualquier barrera son el amor, la fe en Dios y la capacidad de sacrificio.

En primera instancia, me gustaría dar las gracias a mi pareja, Javier, por su increíble dedicación, su admirable paciencia y su incansable apoyo que han hecho no rendirme durante los peores momentos de mi vida.

A mi mejor ángel del cielo, por no abandonarme ni un sólo segundo y por ayudarme a crecer más fuerte en este camino. Gracias Abuelita (†).

De la forma más especial quiero expresar mi más sincero agradecimiento a las personas más trabajadoras y humildes del mundo, mis PADRES, porque incluso con pocos recursos han conseguido que sus hijos lleguen muy lejos; personal, académica y profesionalmente.

Finalmente, quiero agradecer profundamente la oportunidad que me ha otorgado TRIA S.A. y la Universidad Pontificia de Comillas. Gracias por la enseñanza recibida de cada uno de los docentes que me han acompañado a lo largo de mi vida, singularmente la de mi cotutor D. Joan Saura por su gran contribución y su desinteresada colaboración; así como mi antiguo tutor el Dr. D. Alejandro Rodríguez Gómez, él fue quién me animó a emprender este nuevo camino. Todos ellos me han ayudado a crecer como persona, a creer más en mí y a esclarecer lo que puedo llegar a ser capaz de conseguir.

"Los hombres geniales empiezan grandes obras, los hombres trabajadores las terminan".

Leonardo da Vinci

ÍNDICE GENERAL

DESCRIPCIÓN BREVE: INTRODUCCIÓN Y RESUMEN	8
OBJETIVO DEL TRABAJO	9
TAREAS.....	9
PLANIFICACIÓN	10
DESARROLLO	10
1.1. MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	11
1.1.1. Introducción: energía en el ferrocarril	11
1.1.2. Valoración del consumo energético actual de ADIF	14
1.1.3. Cuantificación de la insolación zonal en España.....	17
1.1.4. Tipología de las superficies en desuso	20
1.1.5. Tecnología de generación solar fotovoltaica	23
1.1.6. Legislación vigente	26
1.2. DISEÑO DE POSIBLES SOLUCIONES	28
1.2.1. Ámbito de aplicación del estudio	28
1.2.2. Planteamiento de soluciones tipo	32
1.2.3. Tipo de electrificación y tratamiento de la energía	39
1.2.4. Exposición conceptual del conexionado de red	43
1.3. BALANCE ECONÓMICO	47
1.3.1. Coste de implantación.....	47
1.3.2. Consumo y facturación	51
1.3.3. Rentabilidad y previsión de amortización de la inversión	52
CONCLUSIONES Y APORTACIONES.....	55
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	61
ANEXOS	65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>ILUSTRACIÓN 1 COMPARACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA ENTRE LOS DISTINTOS SECTORES EXISTENTES.....</i>	<i>11</i>
<i>ILUSTRACIÓN 2 RENDIMIENTO DE LA CADENA ENERGÉTICA DEL TRANSPORTE</i>	<i>12</i>
<i>ILUSTRACIÓN 3 ORIGEN DE LAS FUENTES DE LA QUE SE OBTIENE LA ENERGÍA EMPLEADA EN EL TRANSPORTE.....</i>	<i>12</i>
<i>ILUSTRACIÓN 4 FLUJOS DE ENERGÍA EN ESPAÑA.....</i>	<i>13</i>
<i>ILUSTRACIÓN 5 REPARTO DEL TIPO DE ENERGÍA PARA SATISFACER EL CONSUMO DE ADIF.....</i>	<i>15</i>
<i>ILUSTRACIÓN 6 REPARTO DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN LA LAV MADRID-BARCELONA</i>	<i>16</i>
<i>ILUSTRACIÓN 7 REPARTO DE ENERGÍA DE ACUERDO A SUS USOS EN LA LAV MADRID-BARCELONA.....</i>	<i>16</i>
<i>ILUSTRACIÓN 8 DATOS DE LA RADIACIÓN SOLAR EN ESPAÑA ACTUALMENTE.....</i>	<i>18</i>
<i>ILUSTRACIÓN 9 EVOLUCIÓN MENSUAL DE LA RADIACIÓN GLOBAL COMPARADA CON LOS DATOS HISTÓRICOS (MÁXIMOS, MEDIOS Y MÍNIMOS).....</i>	<i>19</i>
<i>ILUSTRACIÓN 10 DATOS DE IRRADIANCIA SOLAR A LO LARGO DEL AÑO EN LA LAV MADRID - BARCELONA CON UNA LATITUD DE 41.5 Y UNA LONGITUD -0.27.....</i>	<i>19</i>
<i>ILUSTRACIÓN 11 PARTES DE UNA MEDIA LADERA</i>	<i>20</i>
<i>ILUSTRACIÓN 12 SECCIÓN TRANSVERSAL DESMONTE.....</i>	<i>21</i>
<i>ILUSTRACIÓN 13 PARTES DE UN TERRAPLÉN</i>	<i>22</i>
<i>ILUSTRACIÓN 14 PROGRESO DEL PRECIO DE LAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE SILICIO CRISTALINO EN (\$/WP).....</i>	<i>26</i>
<i>ILUSTRACIÓN 15 ESQUEMA DE LA LAV MADRID- BARCELONA CON SUS CORRESPONDIENTES PARADAS</i>	<i>29</i>
<i>ILUSTRACIÓN 16 CONEXIONADO DE LA CATENARIA Y LA RED A TRAVÉS DE LAS SET</i>	<i>30</i>
<i>ILUSTRACIÓN 17. TREN S-103 EN SERVICIO AVE BARCELONA-MADRID, A SU PASO POR SANT SADURNI D'ANOIA. OBSÉRVESE LA GRAN SUPERFICIE DE TALUD APROVECHABLE EN ESTE PUNTO DE LA LÍNEA.....</i>	<i>31</i>
<i>ILUSTRACIÓN 18 GÁLIBO FIJADO POR NORMA EN UNA LAV.....</i>	<i>33</i>
<i>ILUSTRACIÓN 19 PLATAFORMA, PEQUEÑO DESMONTE Y SUPERFICIE HORIZONTAL DE LA LAV MADRID-BARCELONA A UNOS 20 KM DEL RÍO CINCA.....</i>	<i>33</i>
<i>ILUSTRACIÓN 20 EJEMPLO DE INSTALACIÓN DE PANEL SOLAR EN DESMONTE RESPETANDO EL SISTEMA DE DRENAJE Y ESCORRENTÍA.....</i>	<i>34</i>
<i>ILUSTRACIÓN 21 EJEMPLO DE DRENAJE EN UN DESMONTE DE ELEVADA INCLINACIÓN.....</i>	<i>34</i>
<i>ILUSTRACIÓN 22 SUPERFICIE HORIZONTAL SEGUIDO DE DESMONTE EN UN TRAMO DE LA LAV MADRID-BARCELONA CONCRETAMENTE ENTRE CALATAYUD Y ZARAGOZA.....</i>	<i>35</i>
<i>ILUSTRACIÓN 23 ZONA HORIZONTAL CONTINUA EN LA ZONA DE LOS MONEGROS DE LA LAV MADRID-BARCELONA COMPRENDIDA ENTRE CALATAYUD Y BARCELONA.....</i>	<i>36</i>
<i>ILUSTRACIÓN 24 ESTRUCTURA MONOPOSTE ADECUADA PARA SUPERFICIE HORIZONTAL</i>	<i>38</i>
<i>ILUSTRACIÓN 25 APOYO PANEL SOLAR TIPO COPLANAR.....</i>	<i>38</i>
<i>ILUSTRACIÓN 26 SUPERESTRUCTURA DE PANEL CON TRIÁNGULO.....</i>	<i>38</i>
<i>ILUSTRACIÓN 27 CONEXIÓN SISTEMA 2X25KV CORRIENTE ALTERNA</i>	<i>41</i>
<i>ILUSTRACIÓN 28 ESQUEMA DE CONEXIONADO DE SUBESTACIÓN DE TRACCIÓN A CATENARIA.....</i>	<i>42</i>
<i>ILUSTRACIÓN 29 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE TRACCIÓN.....</i>	<i>42</i>
<i>ILUSTRACIÓN 30 INSTALACIÓN AL FONDO QUE ABASTECE LA SET DEL ANCHUELO (UNA DE LA LAV MADRID-BARCELONA) PROPIEDAD DE REE.....</i>	<i>44</i>
<i>ILUSTRACIÓN 31 PARTE DE LA SET DEL ANCHUELO PROPIEDAD DE ADIF.....</i>	<i>44</i>
<i>ILUSTRACIÓN 32 ESQUEMA GLOBAL DE CONEXIONADO DE LA NUEVA INSTALACIÓN Y LA EXISTENTE.....</i>	<i>46</i>
<i>ILUSTRACIÓN 33 DESGLOSE DE COSTES DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA.....</i>	<i>48</i>
<i>ILUSTRACIÓN 34 DESGLOSE DE COSTES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA INSTALACIÓN.....</i>	<i>50</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>TABLA 1 PARÁMETROS QUE ESTANDARIZAN LOS CICLOS TEÓRICOS PARA EVALUAR LAS VARIABLES DEL SISTEMA</i>	15
<i>TABLA 2 PARÁMETROS DE LA LAV MADRID-BARCELONA</i>	32
<i>TABLA 3 CARACTERÍSTICAS DE LA ISNTALACIÓN Y PROPIEDADES DE LOS MÓDULOS FOTVOLTAICOS ..</i>	37
<i>TABLA 4 CUADRO-RESUMEN CON LOS RESULTADOS DE LA INSTALACIÓN A IMPLANTAR</i>	51

DESCRIPCIÓN BREVE: INTRODUCCIÓN Y RESUMEN

Ante la actual situación del gran consumo eléctrico de las instalaciones de ADIF y la existencia de grandes explanaciones sin funcionalidad técnica alguna a lo largo de la traza de las nuevas líneas de alta velocidad, se decide estudiar la posibilidad de poder generar parte de esa energía mediante placas fotovoltaicas colocadas en dichas zonas en desuso. El gran índice de radiación solar en España juega un importantísimo papel en este estudio, como se verá más adelante. Los factores que se han estudiado durante el desarrollo del Trabajo son los siguientes:

- Estudio del aprovechamiento de los terrenos propiedad del ADIF.
- Disminución del coste de consumo eléctrico del gestor de la infraestructura ferroviaria (Adif) valorando la cantidad de energía que se puede inyectar a la red interna
- Fomento de la descarbonización del sistema ferroviario.
- Diseño de soluciones modulares y lo más genéricas posibles para la instalación de los paneles fotovoltaicos, de fácil aplicación según las condiciones de instalación: talud en desmonte, talud en relleno, espaldones de pasos inferiores o superiores, terrenos planos, etc.

En conclusión, el trabajo consiste en un análisis de las posibilidades de explotación de la plataforma ferroviaria para la generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables (energía solar fotovoltaica). En concreto, se estudiarán las posibilidades de utilizar la superficie actualmente en desuso, como son taludes de relleno o desmonte o explanaciones fuera del gálibo ferroviario, para la instalación de sistemas de generación de energía eléctrica solar fotovoltaica (ver anexo 3 para visualizar la instalación descrita). Se realiza una cuantificación de la superficie necesaria para que la instalación sea rentable, coste de la misma, valor de la potencia nominal obtenida en la red interna de ADIF y capacidad de amortización del sistema, todo ello comparándolo con el coste actual de consumo de energía sin la implantación de esta instalación.

Como línea de estudio fundamental y aplicación de la idea innovadora se ha considerado la LAV Madrid-Barcelona-Frontera Francesa, en su tramo central entre Madrid y Barcelona.

OBJETIVO DEL TRABAJO

El fin último del estudio del aprovechamiento de la infraestructura ferroviaria (explanaciones inutilizadas), mediante la colocación de placas fotovoltaicas, es la generación de energía para el autoconsumo de la red ferroviaria. Con esta alternativa se podría conseguir un gran beneficio económico para el mayor consumidor eléctrico del país (ADIF), al obtenerse de fuentes no finitas parte de esa energía necesaria para el funcionamiento del material rodante incluso de sus instalaciones fijas.

Nótese que este estudio no tiene como objetivo la realización de un profundo análisis técnico, este proyecto acontecería tras este estudio de viabilidad si se consiguieran resultados óptimos.

TAREAS

Para el desarrollo del estudio recogido en el presente trabajo se han establecido un conjunto de tareas.

En primer lugar, se ha realizado una investigación general desde un punto de vista más teórico. Para ello, se ha indagado sobre la repercusión del consumo de energía del tren en el transporte y a su vez cuánto consume este último con respecto al resto de sectores.

En esta primera fase también se han estudiado los datos de insolación por zonas del país, la tecnología empleada para la captación de esta irradiación y la legislación por la que se regula este sistema.

En segundo lugar, se ha establecido de acuerdo a la tipología de las superficies en desuso una solución lo más versátil posible. A continuación, se han expuesto las características propias de la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona como posible ámbito de aplicación de la solución expuesta. Una vez estudiada la superficie y el posible lugar de implantación, se ha expuesto por un lado, el tipo de electrificación empleada en las líneas de alta velocidad (afín a la línea escogida) y por otro, el conexionado que debe realizarse para poder usar la energía generada.

Por último y no menos importante, se ha valorado la cuantificación de la inversión, el gasto económico que tendría ADIF con esta instalación por metro cuadrado y lo que esta entidad se

ahorraría una vez amortizada la inversión. Con todas estas tareas se ha realizado un análisis o balance económico donde puede identificarse la posible viabilidad de esta idea.

Para el apartado de conclusiones se ha hecho un análisis global de todo el trabajo y con esto se ha llegado a una visión personal sobre la posibilidad de implantación de la idea de fondo existente en el presente trabajo.

PLANIFICACIÓN

Después de varios meses de indagación para establecer una temática atractiva y original para el Trabajo Fin De Máster se escogió el tema de la generación y consumo de energía renovable en el sector ferroviario (concretamente para la línea Madrid-Barcelona) empleando la infraestructura desaprovechada de la misma. Una vez decidida la temática y aprobada por la Dirección del Máster, se procedió al establecimiento de tareas para llevarlo a cabo de la forma más correcta. El seguimiento de tareas propuesto ha sido:

- Investigación detallada del tema a tratar: enero –marzo 2018
- Recopilación de datos e ideas innovadoras: enero-junio 2018
- Análisis del lugar de implantación de la temática del trabajo, es decir, aplicación directa a una situación real : abril-mayo 2018
- Análisis de los factores contraproducentes que pueden surgir de la implantación de la idea aportada : mayo-julio 2018
- Redacción de memoria: mayo-julio 2018
- Conclusiones: julio-2018

DESARROLLO

En este apartado, mucho más extenso con respecto a los demás, se van a detallar los fundamentos teóricos y el marco de ubicación que ayudarán al lector a entender claramente todos los términos e ideas empleados en el transcurso del trabajo. También se expondrán las líneas de actuación y la descripción a fondo de la competitiva idea de implantación.

1.1. MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

1.1.1. Introducción: energía en el ferrocarril

España es actualmente el mayor consumidor de energía en cuanto a transporte se refiere, es decir, es el sector que mayor consumo de energía final posee por habitante (llegando incluso a sobrepasar a la industria o el sector servicios como se puede mostrar en el siguiente gráfico).

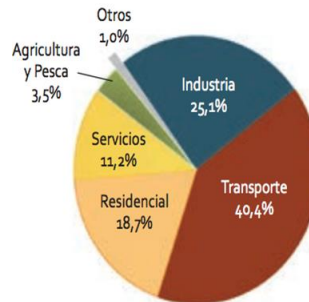


Ilustración 1 Comparación del consumo de energía entre los distintos sectores existentes

Para evaluar el impacto energético real del transporte se debe realizar un análisis riguroso de toda la cadena energética, es decir, desde la energía que se invierte en la elaboración del material móvil, pasando por la destinada a la ejecución de la infraestructura que estos requieren para su actividad, hasta la energía que consumen durante la misma. Dicho proceso de transformación y transporte se muestra en la siguiente imagen, donde se pueden verificar la existencia de ciertas pérdidas y costes energéticos asociados. No obstante, se puede verificar que dentro del sector del transporte el ferrocarril, concretamente los trenes eléctricos de alta velocidad, son el modo más eficiente (de mayor rendimiento) por unidad de masa transportada y por unidad de superficie cubierta para el transporte de viajeros.

Uno de los grandes problemas de este medio de transporte que hay que tratar de solventar es la ineficiencia de la quema de combustibles fósiles en la central generadora de la electricidad necesaria para su actividad. En la ilustración 2 se exponen los porcentajes de eficiencias de obtención de la energía y los que llegan finalmente a los diferentes medios de transporte. A pesar de la ineficiencia citada el transporte ferroviario sigue siendo de los más eficaces

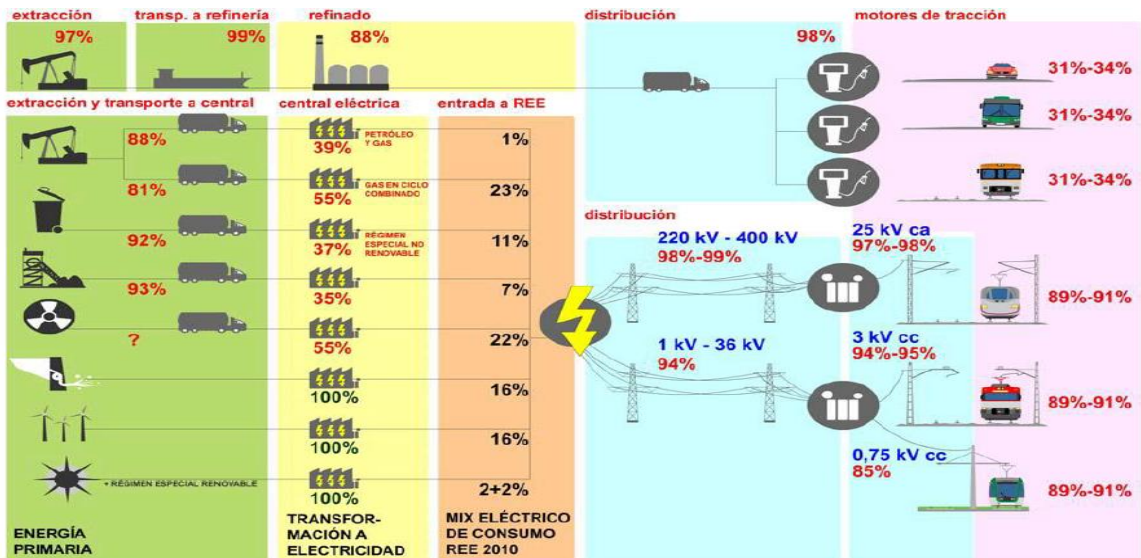


Ilustración 2 Rendimiento de la cadena energética del transporte

En España, el 94.4% de esa energía consumida por el transporte es proveniente de fuentes fósiles como el carbón, el gas natural o el petróleo, en la ilustración 3 se puede observar la proporción empleada de cada una de ellas en el transporte.

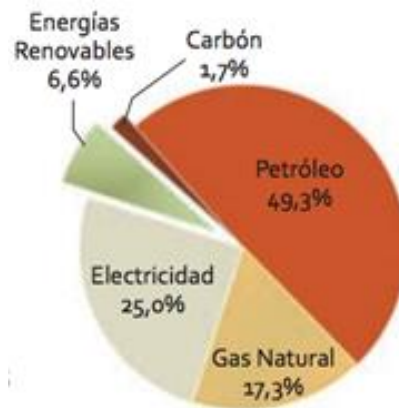


Ilustración 3 Origen de las fuentes de la que se obtiene la energía empleada en el transporte

Esto último no sólo afecta a la contribución del agotamiento de estos recursos no renovables sino que también ocasiona una fuerte dependencia de países internacionales poco estables; de ahí que en ocasiones se dé un fuerte desequilibrio en la balanza de pagos. En la ilustración 4 se expone un gráfico en el que se muestra los flujos de energía en España, donde se puede verificar que la mayoría de la energía final es destinada al transporte.

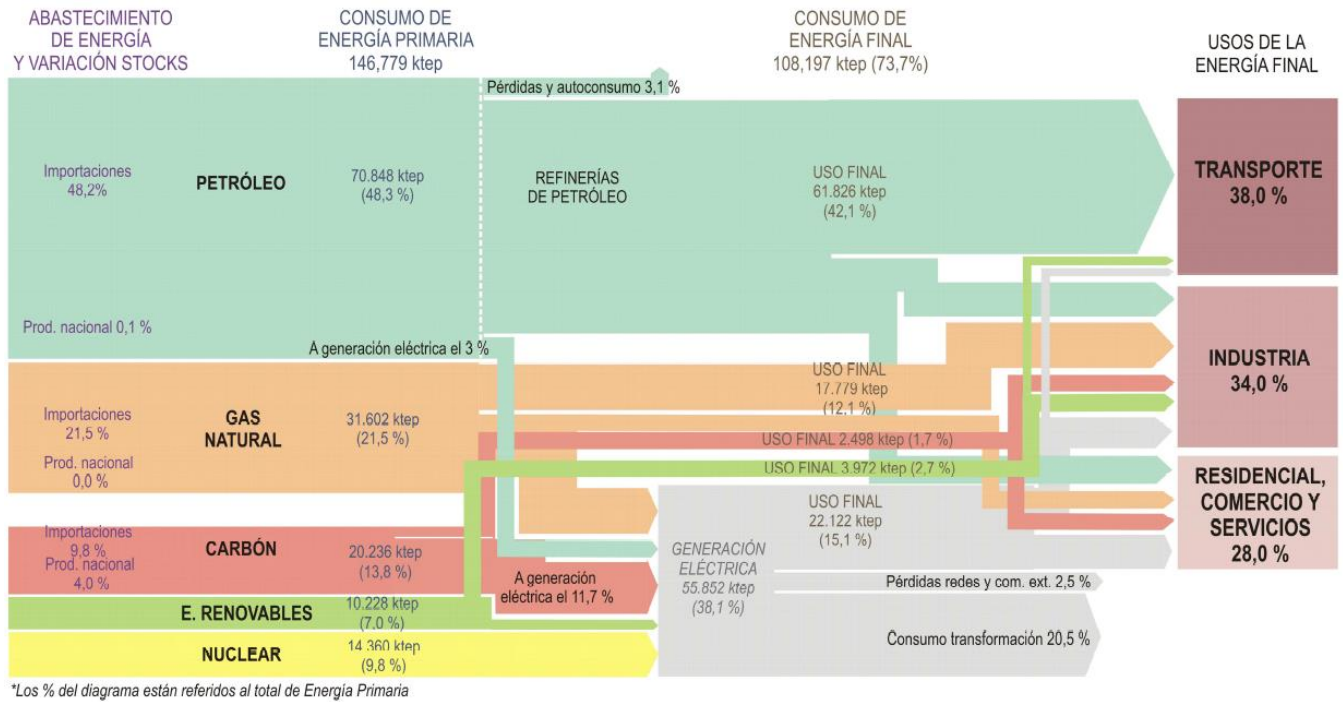


Ilustración 4 Flujos de energía en España

Cabe señalar que además de los efectos contraproducentes que ya se han citado, mediante la quema de combustibles fósiles se genera un gran nivel de contaminación: generación de residuos tóxicos, emisiones de efecto local a la atmósfera, contaminación de aguas y agravamiento de la balanza energética de los mercados entre otros.

Todo esto puede llevar a graves consecuencias en un futuro como: posible reducción del 2% del contenido de O₂ en aire y efectos visibles del cambio climático.

Pues bien, para idear soluciones innovadoras se debe focalizar gran parte de la atención en el sector del transporte dado que en España el 65% del petróleo se invierte en satisfacer su energía.

Es por este motivo por el que surge la temática de este trabajo, idear una alternativa energética en el sector del transporte ferroviario, disminuyendo el uso de fuentes de energía finitas de las que España carece.

Todo ello empleando las explanaciones desaprovechadas de la infraestructura ferroviaria con el objetivo de obtener la mayor rentabilidad al nivel de radiación solar tan elevado que existe en España.

1.1.2. Valoración del consumo energético actual de ADIF

El consumo de energía y en consecuencia las emisiones del Administrador de la Infraestructura no dependen totalmente del material rodante, sino también del servicio que este último presta, sus estaciones y bases de mantenimiento.

El servicio del material se caracteriza por una infraestructura concreta (velocidad máxima, perfiles, túneles...) y por una forma de operación determinada (número de paradas, márgenes de tiempo...). Por tanto, un mismo tren puede tener consumos muy diferentes en distintos servicios, de ahí la gran fluctuación que puede sufrir una estimación de la energía consumida por esta entidad. De modo que, un vehículo puede tener varios indicadores absolutos y específicos de consumo (uno para cada uno de los servicios que pueda realizar).

Por razones prácticas, las variables del servicio (incluyendo tanto las de infraestructura como las particulares operativas) se estandarizan en “ciclos teóricos”. Estos están caracterizados por los parámetros siguientes:

Características de la infraestructura		
Longitud	Km	L_{linea}
Longitud de túneles	Km	$L_{\text{túnel}}$
Factor de túnel (Tf)		T_f^s
Tensión de alimentación	kV	T_a
Diferencia de altitud	M	A_{od}^s
Coefficiente de curvas	saN/t	C_c^s
Exceso específico de altura	Mm/km	E_p^s
Velocidad media del viento exterior	Kmh	V_{ve}
Características del servicio		
Velocidad máxima del servicio	Km/h	V_{maz}^s
Velocidad media del servicio(sin parada)	Km/h	V_{media}^s
%aprovechamiento s/plazas estándar	%	$A_{\text{pl-es}}^s$
Densidad de plazas y servicios		ρ_{ps}^s
Coefficiente de trenes vacíos y sin servicio		C_v^s
Paradas comerciales equivalentes	Nº	N_{pc}
Paradas teóricas programadas	Nº	N_{pt}

Paradas técnicas programadas	Nº	N_{ptp}
Paradas equivalentes por reducción de velocidad	Nº	N_{perv}
Tiempo medio parada comercial	Nº	T_{pc}^s
Características d los períodos fuera de servicio		
Tiempo acondicionamiento previo	Min	T_{ap}^s
%de potencia usada en acondicionamiento previo	%	P_{ap}^s
Tiempo en taller y limpieza	Min	T_1^s
% de potencia usada en limpieza	%	P_1^s
Tiempo de estacionamiento (hibernación)	Min	T_{hi}^s
% de potencia usada en hibernación	%	P_{hi}^s

Tabla 1 Parámetros empleados para evaluar las variables del servicio

Los principales consumos de energía de ADIF provienen del consumo de energía eléctrica, el cual es utilizado para los equipos de mantenimiento de vías, maniobras a talleres, operaciones auxiliares en terminales, maniobras en estaciones y tracción de material rodante.

De acuerdo al informe de Sostenibilidad y gobierno Corporativo de ADIF de 2016 (el último disponible), se tiene que los principales consumos de energía provienen del consumo de energía eléctrica y gasóleo B, consultar ilustración 5:

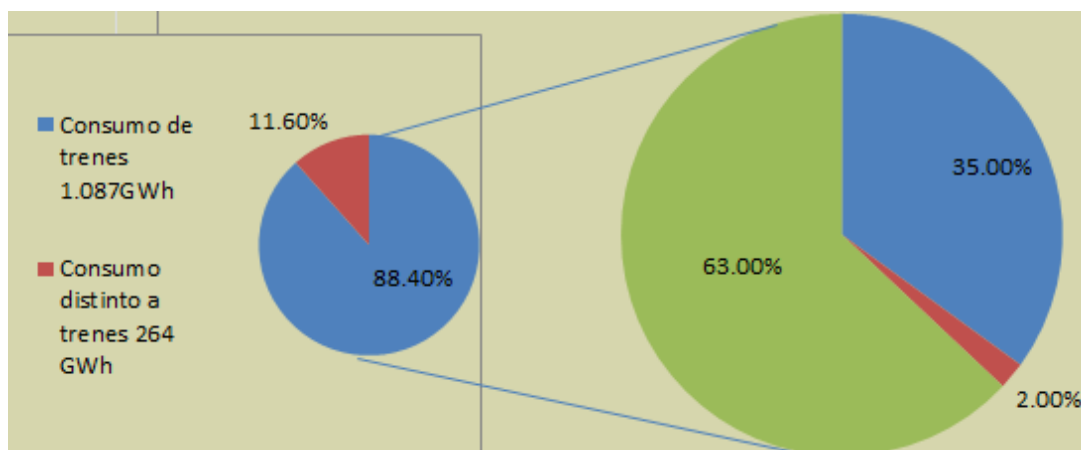


Ilustración 5 Reparto del tipo de energía para satisfacer el consumo de ADIF

Por tanto, de los principales tipos de consumo de energía (gasóleo, gas natural y energía eléctrica) el 63 % es de origen eléctrico y de ese 63 % el 11.6 % proviene de consumos diferentes a los propios trenes y el 88.4 % restante proviene del consumo de estos últimos. De modo que, en el transporte ferroviario la mayor parte del consumo de energía se encuentra destinado a satisfacer la demanda del material rodante. Pues bien ese 88.4% se distribuye a su vez como muestra la imagen 6:

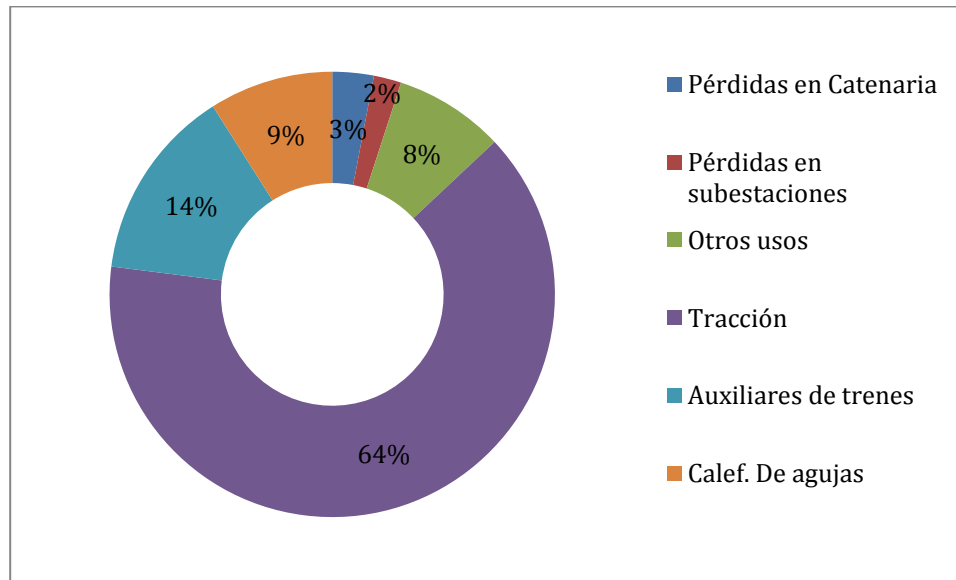


Ilustración 6 Reparto del consumo energético en la LAV Madrid-Barcelona

Como se puede observar en el siguiente gráfico, los consumos de los trenes (tracción y auxiliares) son los más importantes del total de energía consumida con respecto a talleres, estaciones, oficina, auxiliares de la infraestructura y devolución a la red pública de ahí que estos ocupen aproximadamente entre el 84 y 88% del total de la energía.

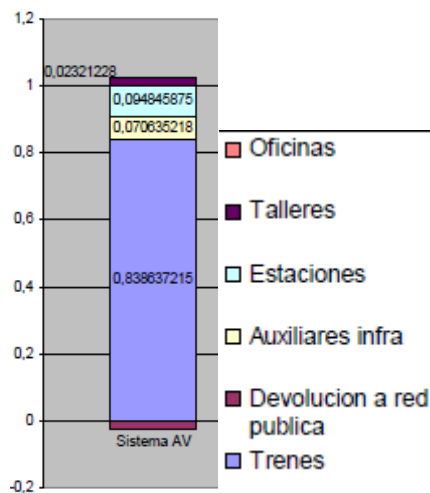


Ilustración 7 Reparto de energía de acuerdo a sus usos en la LAV Madrid-Barcelona

En ADIF el consumo de energía eléctrica ascendió en 2017 a 2.791.947.000 kWh (2.6 TWh aproximadamente) contabilizando sólo tracción ferroviaria. Con estas cifras se puede establecer que el transporte ferroviario posee aún una fuerte dependencia de la energía eléctrica.

Por todo ello, se debería cuestionar si el AVE es un medio de transporte todo lo limpio que debería ser y si sólo con los planes de Ahorro y Sostenibilidad de ADIF se podrían satisfacer la eficiencia y ahorro energético que se persigue.

España, un país que dispone de fuertes recursos de energías renovables, ha apostado por la alta velocidad, invirtiéndose grandes cantidades de dinero en el desarrollo de una nueva red ferroviaria de altas prestaciones. Por esto, puede ser de gran utilidad realizar un estudio en el que se analice la posibilidad de generar gran parte de esa energía requerida mediante fuentes de energía renovable.

1.1.3. Cuantificación de la insolación zonal en España

El Sol representa una gran fuente energética de mucha utilidad e inacabable. Emite un enorme flujo radiante del cual una elevada cantidad es absorbida por nuestro planeta, proporcionando la energía que hace posible la existencia de la vida y mucho más.

La “constante solar” es la cantidad de energía radiante procedente del Sol que, por término medio, se recibe por unidad de tipo y área por una superficie perpendicular a los rayos solares situada en el límite exterior de la atmósfera.

Al atravesar la atmósfera la radiación solar sufre un proceso de atenuación como consecuencia de los gases presentes en la misma, es decir, la atmósfera modifica la distribución espectral de la radiación solar reduciendo la magnitud del flujo radiante el cual finalmente alcanza la superficie como radiación directa y difusa.

Por tanto, la irradiación es la magnitud del flujo radiante incidente por unidad de superficie, es decir, mide la radiación solar que alcanza la superficie terrestre en unidades de energía por tiempo y área. Por su parte, la irradiación global es el flujo total recibido por una superficie unitaria horizontal y originado tanto por la componente directa como la difusa. Su expresión viene dada por

$$I = \frac{E}{t * A} \text{ donde } P = \frac{E}{t} \text{ luego } I = \frac{P}{t} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Es por esto que la unidad de medida es el Vatio por metro cuadrado. Esta magnitud es de gran interés para medir el aprovechamiento de la energía solar.

En la ilustración 7 se muestra un mapa extraído de la Agencia Estatal de Meteorología en el que se refleja la cantidad de insolación diaria por zonas (en $\text{kW/m}^2 \cdot \text{día}$) que existe en España. Estos datos son de especial interés a la hora de considerar la cantidad de paneles solares que serán necesarios para hacer rentable la instalación.

De forma paralela, se expone en la ilustración 8 un gráfico que refleja la evolución de la irradiación solar a lo largo del año en la LAV Madrid-Barcelona la cual va a ser objeto de estudio. En ese gráfico se muestran tres curvas que se corresponden con la variación de los valores reales obtenidos hasta enero de 2018, la evolución de los valores promedios y los valores máximo y mínimos que se esperan a lo largo del año actual



Ilustración 8 Datos de la radiación solar en España actualmente

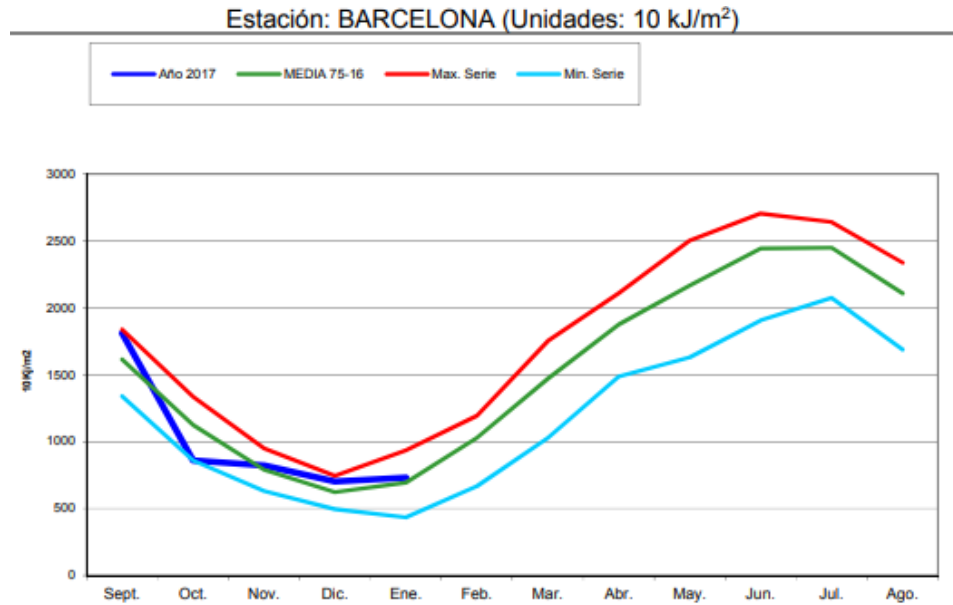
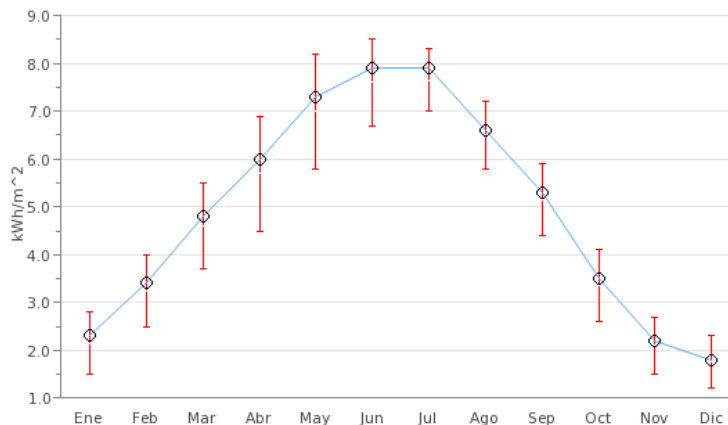


Ilustración 9 Evolución mensual de la radiación global comparada con los datos históricos (máximos, medios y mínimos)

Una vez evaluada la gran cantidad de radiación solar presente en España si se particulariza la misma para la línea donde se ha decidido instalar los paneles solares (línea de alta velocidad Madrid-Barcelona) se obtienen los valores mostrados en la ilustración 10.



(kWh/m ²)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Percentil 75	2.8	4.0	5.5	6.9	8.2	8.5	8.3	7.2	5.9	4.1	2.7	2.3
Valor medio	2.3	3.4	4.8	6.0	7.3	7.9	7.9	6.6	5.3	3.5	2.2	1.8
Percentil 25	1.5	2.5	3.7	4.5	5.8	6.7	7.0	5.8	4.4	2.6	1.5	1.2

Ilustración 10 Datos de irradiancia solar a lo largo del año en la LAV Madrid - Barcelona con una latitud de 41.5 y una longitud -0.27

La gráfica muestra la irradiancia solar ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{día}$) para los días típicos de las distintas estaciones del año en la línea sobre la que se quiere establecer la instalación fotovoltaica. Se puede contrastar que durante el invierno se reciben valores menores de irradiancia ya que el número de horas de sol es menor. Por su parte, en verano se llega a los valores más elevados ya que no sólo se cuenta con un mayor número de horas de sol sino que también el sol incide perpendicularmente sobre la superficie terrestre. Se puede observar que de media esta zona recibe $4.92 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{día}$

Por tanto, estas instalaciones de energía solar fotovoltaica constituyen un circuito solar que produce energía eléctrica en función de la radiación solar incidente en cada momento del día; de modo que, los valores de generación de electricidad registrados variarán según la hora del día, la época del año y la meteorología. No todas las horas de sol son 100% útiles, es decir, la irradiancia útil abarca desde las 8:00h a las 22:00h en verano y desde las 8:00h a las 18:00h en invierno según la Agencia Estatal de Meteorología.

1.1.4. Tipología de las superficies en desuso

Una vez planteado el trazado en alzado de una línea ferroviaria se pueden encontrar tramos en los que la vía puede estar por encima o por debajo del terreno natural. Las obras de tierra son las excavaciones o los depósitos de material que permiten posicionar la vía en la cota establecida en el trazado en alzado.

Cuando el perfil longitudinal de la vía debe encontrarse por encima del terreno natural se denomina terraplén. En el caso contrario (vía por debajo del terreno natural) se denomina desmonte. Así, las obras de tierra o explanaciones (a las que se le quiere dar uso en el presente trabajo) son la sucesión de desmontes y terraplenes que crean la infraestructura sobre la que se dispone la plataforma. También pueden existir zonas en las que haya tramos a media ladera, con una parte en desmonte y otra en terraplén.

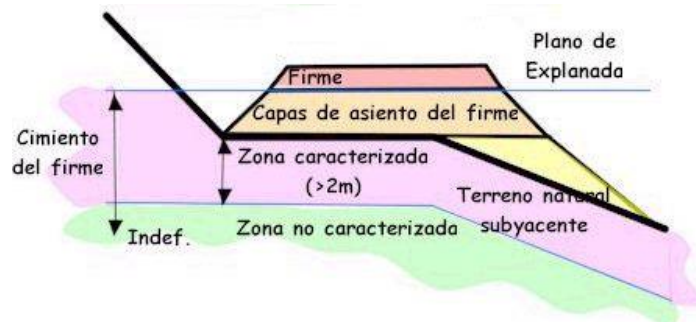


Ilustración 11 Partes de una media ladera

Por tanto, un desmonte es una excavación en el terreno en el que la rasante se posiciona por debajo de la cota natural del terreno

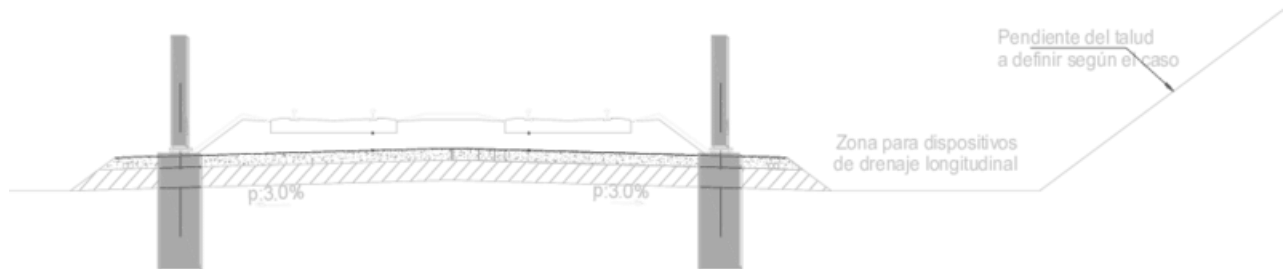


Ilustración 12 Sección transversal desmonte

La parte fundamental de un desmonte son sus taludes, lo cuales se caracterizan por su inclinación. Para establecer este valor se debe realizar un estudio geotécnico que proporciona el tipo de terreno existente y en función del mismo determinar una inclinación para garantizar la estabilidad del terreno.

Para el caso que nos incumbirá en el presente trabajo, la naturaleza del suelo es margas o rocas en general a las cuales les corresponde un talud H/V de 1/2 y 3/2 respectivamente.

Es muy importante tomar una decisión adecuada de la pendiente del talud ya que solo así se podrán evitar: desprendimientos, bolos y cantos rodados con la correspondiente erosión que acarrearán, obras de protección que implican un coste importante o deslizamientos de ladera. Muchas veces, aunque implique realizar un talud más tendido es necesario asegurar la seguridad de la obra de tierra.

Desde el punto de vista geológico, cabe distinguir entre materiales rocosos con taludes que pueden llegar a ser verticales y materiales blandos que requieren taludes más tendidos. Es evidente, que todos los terrenos no admiten taludes más o menos inclinados y que aseguren su perfecto funcionamiento, es el caso de terrenos muy fracturados, por ejemplo. En estos casos, puede que sí sea necesario aplicar técnicas de sostenimiento como anclajes o bulones o construir obras de protección como muros, falsos túneles, etc.

En el caso de un desmonte que, no deja de ser una gran zanja en el terreno la cual pone freno a la continuidad del mismo, la escorrentía superficial se ve alterada. Por ello, se debe

diseñar el correspondiente sistema de drenaje superficial que servirá para canalizar el flujo superficial de agua que se crea en periodos de lluvia y evitar que ésta discorra libremente evitando movimientos de tierra.

Todos estos parámetros: inclinación de taludes, escorrentía por su superficie, sistema de evacuación de aguas pluviales, sistemas de sostenimiento, etc. son claves para determinar la capacidad de un talud para instalar en él las futuras placas solares. En general, se puede decir que un talud de desmote es menos indicado que un talud de relleno para instalar las placas solares, puesto que la adición de cargas modifica el estado de tensiones del terreno y puede llevar, en algunos casos, a la desestabilización del talud (y por consiguiente, a un corrimiento de tierras). En cambio la instalación de placas solares en los taludes de relleno, habitualmente más tendidos y con mejores accesos, resulta más favorable.

Por su parte el terraplén (depósito de terreno que posiciona la rasante por encima del terreno natural) se compone de cuatro zonas:

- Coronación: parte superior del relleno cuya superficie constituye la explanada sobre la que se asientan las capas intermedias de la plataforma.
- Núcleo: Parte del relleno constituida por el material colocado entre el cimiento y la coronación, en la zona central del terraplén.
- Espaldón: Parte exterior del relleno constituido por material que envuelve lateralmente el núcleo protegiéndolo de los agentes externos.
- Cimiento: Parte inferior del terraplén en contacto con el terreno natural o de asiento.

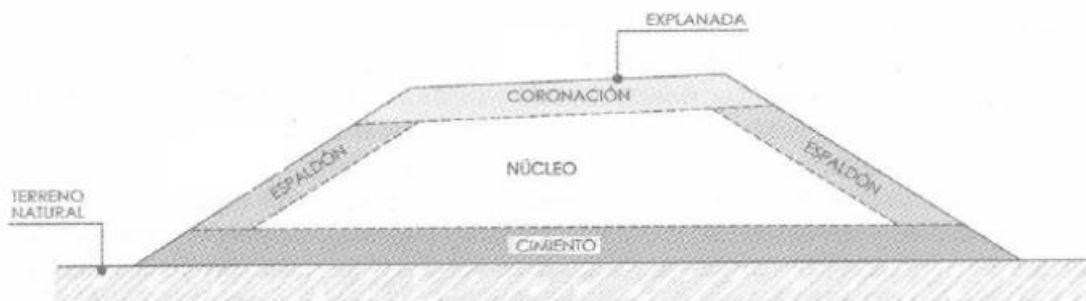


Ilustración 13 Partes de un terraplén

Por último, es importante resaltar que en los terraplenes la capa de forma suele estar constituida por suelos de mejores características que el utilizado para la formación del núcleo, teniendo, además, un mayor grado de compactación. Y por su parte, en los

desmontes la capa de forma se obtiene por compactación del fondo de la excavación, cuando los suelos son adecuados, o por aportación de suelos de mejor calidad cuando el suelo excavado no lo es.

1.1.5. Tecnología de generación solar fotovoltaica

a. Fundamento de la energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica consiste en la conversión directa de la luz solar en electricidad, mediante un dispositivo electrónico denominado “célula solar”. La conversión de la energía de la luz solar en energía eléctrica es un fenómeno físico conocido como “efecto fotovoltaico”. Esta transformación en energía eléctrica se consigue aprovechando las propiedades de los materiales semiconductores mediante las células fotovoltaicas.

El funcionamiento de las células fotovoltaicas, se vale de un campo eléctrico generado previamente a partir de la polarización de dos zonas de la célula. De esta manera se consigue que una de sus dos zonas tenga:

- Ánodo, llamado zona positiva, la cual tiene un defecto de electrones. Esto se consigue añadiendo al material base (silicio) una pequeña parte de boro, el cual solo tiene 3 electrones de valencia.
- Cátodo, llamado zona negativa, la cual tiene exceso de electrones. Esta zona se consigue añadiendo fósforo, el cual tiene 5 electrones de valencia.

Por otro lado, cuando la luz del sol, y por tanto sus fotones, impactan sobre un material semiconductor, (como es la base de silicio de la célula), un fotón arranca un electrón de la superficie de la célula, quedando así un electrón libre y el “hueco” que antes ocupaba ese electrón. Los electrones de manera natural tienden a reorganizarse, de manera que cuando están libres tienden a ocupar “huecos”. De ser así la energía se convierte en calor, y el material que estaba excitado, deja de estarlo.

Es aquí donde tiene un papel fundamental el campo eléctrico generado por los materiales de la célula anteriormente hablado, y es que es este campo eléctrico es el que obliga a los electrones a moverse en una sola dirección, hacia el cátodo, evitando así que rellenen los “huecos”. De esta forma se produce una diferencia de potencial en la célula, o lo que es lo

mismo una diferencia de tensión entre los dos extremos de la célula, que hacen que la ésta se comporte como una pila.

b. Características de la energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica presenta numerosas y particulares características como son:

- Pequeño o nulo impacto ecológico
- Inagotable a escala humana
- Elevada calidad energética

Un aspecto muy importante a valorar, es el impacto ecológico, y es que cada KWh generado con energía solar fotovoltaica evita la emisión a la atmosfera de aproximadamente 1Kg de CO₂, en el caso de la generación eléctrica de carbón, o 0,4 Kg de CO₂ en el caso de generación con gas natural.

Además este tipo de energía permite un gran número de aplicaciones, ya que puede suministrar energía en emplazamientos aislados como son viviendas aisladas, postes de socorro, bombeos de aguas de riego, etc. Entre todas estas aplicaciones y posibilidades esta la idea principal de este proyecto que es la generación para el propio autoconsumo del administrador de la infraestructura ferroviaria.

c. Componentes de un sistema solar fotovoltaico conectado a red.

Un sistema solar fotovoltaico consta de cuatro elementos básicos, que son las placas solares; el inversor; un cuadro de interconexión con la red eléctrica comercial y el cableado.

- Placas solares. Las placas solares están compuestas por células fotovoltaicas interconexionadas, de las cuales ya se ha hablado en apartados anteriores. Un aspecto a destacar de las placas, es el soporte-estructura de las mismas. Este elemento tiene una relevancia destacada ya que a partir de él se obtendrá la inclinación óptima para adquirir la mayor rentabilidad del sistema. Existen numerosos tipos de soportes, y su elección estará condicionada por la superficie de instalación de la placa. Este aspecto se estudiará con más profundidad en el apartado 1.2.2.

- El inversor. Este dispositivo es el encargado de convertir la energía generada, la cual se obtiene en corriente continua, en corriente alterna que es la usada en la red eléctrica. Este elemento es una de las partes más importantes del sistema fotovoltaico y es el elemento que más repercute sobre el coste de operación y mantenimiento ya que normalmente necesitan de frecuentes recambios.
- Cuadro de interconexión con la red. Obligatoriamente este cuadro debe incorporar los siguientes elementos: seccionador automático, diferencial, contadores, seccionador manual y fusibles de entrada a la instalación. Además de forma opcional sería recomendable instalar algún tipo de protección junto a los inversores (para tareas de mantenimiento).
- Cableado. Este elemento es el encargado del transporte de la energía eléctrica desde su generación, para su posterior distribución. En el caso que ocupa este trabajo el cableado será el propio de una línea de media tensión.

d. Progreso del precio de la energía solar

Los inicios de la energía solar fotovoltaica se remontan a los años cincuenta, en forma de las primeras células fotovoltaicas, las cuales se usaron principalmente para proveer de energía a los satélites. Desde ese tiempo la apuesta por el I+D+i, y la ilusión por disponer de una fuente de energía inagotable y limpia, han provocado desde los años cincuenta hasta la actualidad, unas pronunciadas bajadas de precio de esta electricidad, siendo en 2013 el coste 100 veces menor que lo era 36 años atrás. Como dato significativo en Kansas, Estados Unidos, el precio de la energía fotovoltaica se sitúa en 6 céntimos de dólar, un precio muy reducido si se compara con 40 años atrás.

Además de esto, la eficiencia que se obtiene de los sistemas fotovoltaicos es cada vez mayor. Esto junto con las investigaciones de nuevos materiales que no estén sujetos a limitaciones físicas propias de los materiales semiconductores, podría llegar a lograr que se doblara o incluso triplicara la eficiencia actual, con la consiguiente bajada de precios que esto supondría.

A todo este fenómeno de abaratamiento de la energía solar se le ha denominado efecto Swanson, ilustrado en el siguiente gráfico con el precio por Vatio, desde 1977 hasta el 2015

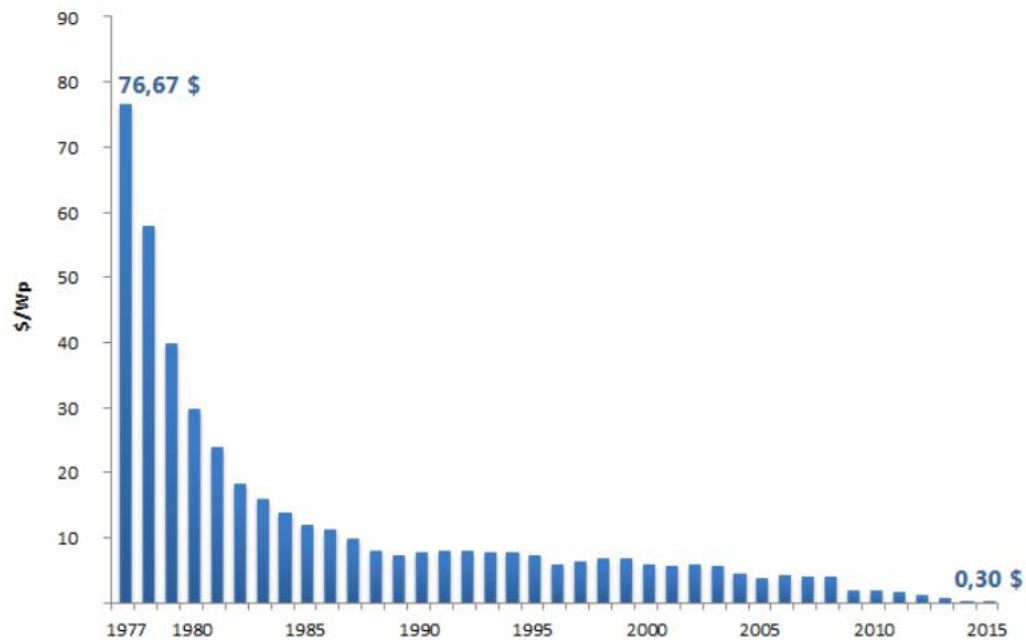


Ilustración 14 Progreso del precio de las células fotovoltaicas de silicio cristalino en (\$/Wp)

1.1.6. Legislación vigente

Antes de proceder con la exposición del diseño de la idea de estudio, es de especial relevancia exponer al lector la regulación vigente de esta de tecnología en el mercado español.

Se va a abordar dos grandes bloques de legislación, el primero propiamente del sector ferroviario, y el segundo más específico de la energía solar fotovoltaica.

a. Legislación del sector ferroviario

- Ley 38/2015, de 29 de septiembre, del sector ferroviario. En ella se detalla como los administradores generales de infraestructuras ferroviarias contratarán con arreglo a la Ley 21/2007. Además habla de los cánones por utilización de las instalaciones de transformación y distribución de la energía eléctrica de tracción.
- Ley 31/2007, de 30 de octubre, sobre procedimientos de contratación en los sectores del agua, la energía, los transportes y los servicios postales. Esta ley es

nombrada en la anterior, y es la ley en la que se el procedimiento de contratación en los sectores de la energía y los transportes, ámbitos tratados en el presente trabajo.

b. Legislación de la energía solar fotovoltaica

- Real Decreto 1699/2011, de 18 de noviembre, por el que se regula la conexión a red de instalaciones de producción de energía eléctrica de pequeña potencia. En esta ley aparecen por primera vez las primeras referencias al autoconsumo. Además ofrece incentivos a la instalación de sistemas de autoconsumo fotovoltaicos.
- Orden IET/3589/2011. Esta norma suprime los incentivos que establecía el Real decreto anterior.
- Real Decreto 900/2015, de 9 de octubre, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo. Esta norma solo regula el autoconsumo, y por tanto todo sistema fotovoltaico totalmente aislado de la red queda fuera de este Real Decreto. Este Real Decreto es popularmente conocido como “Impuesto al sol” debido a que impone un peaje de respaldo a todo sistema fotovoltaico que esté conectado a la red, e importe energía de la misma alguna vez. Además se regulan dos tipos de autoconsumo conectado a la red. El tipo 1 es para sistemas no inscritos en el registro de productores, con potencia contratada inferior a 100kW, y con el sistema conectado a la red y con capacidad de verter a la red el excedente, aunque este excedente nunca será remunerado. El tipo 2 es para aquellos sistemas si registrados como productores. Estas instalaciones deberán estar conectadas a la red y si podrán cobrar el excedente volcado a la red. En ambos tipos la suma de las potencias de generación instaladas no podrá superar la potencia contratada.

Por lo tanto, para asegurar la rentabilidad del sistema de generación fotovoltaica, se diseña el mismo de forma aislada de la red eléctrica general. Esto es, dicho de otro modo, que la instalación de generación será propiedad y estará gestionada íntegramente por ADIF, vertiendo la energía generada, como se verá más adelante, aguas abajo de la acometida que cada subestación de tracción tiene con la Red Eléctrica pública. Esto se diseña así para evitar el pago del peaje de respaldo, que lastraría la rentabilidad de la instalación, y para evitar sobrecostes de tener que conectar la instalación fotovoltaica con la red eléctrica pública en zonas dónde la misma está muy alejada del punto de generación.

1.2. DISEÑO DE POSIBLES SOLUCIONES

1.2.1. Ámbito de aplicación del estudio

Antes de explicar cómo se debe proceder para la implantación de la instalación del estudio que acontece, se van a exponer las características de la línea que se ha escogido y su correspondiente justificación.

Como aplicación del análisis de viabilidad que se propone en este trabajo, se plantea la LAV Madrid-Barcelona-Frontera Francesa, en su tramo central entre Madrid y Barcelona.

Existen varias razones por las que se ha decidido aplicar esta tecnología a una línea de alta velocidad, una de ellas es porque es un sistema ferroviario de corriente alterna (normalmente de 2x25kV) de modo que existen menos pérdidas por la acometida (último tramo de la red de distribución de la empresa suministradora). Esto ocurre porque este tipo de electrificación permite realizar más fácilmente el transporte de energía a alto voltaje, es decir, se va a requerir menor corriente para transportar la potencia requerida lo cual se traduce en una disminución de las pérdidas de energía durante el mismo.

Además de esta razón, se ha optado por una aplicación a un modelo de línea electrificada en corriente alterna porque de ese modo es mucho más sencillo que al paso del tren por la zona de generación de energía este la consuma.

Otra de las razones por las que se ha escogido una línea de Alta Velocidad y no una convencional es porque esta última posee explanaciones de mucho menor tamaño. Además, las líneas convencionales poseen una regularidad de aprovechamiento muy inferior dado la frecuencia más reducida de sus trenes. Por tanto, parte de la energía generada tendería a perderse si no se aprovecha o no se vierte a la red.

Por su parte, la justificación de que se haya escogido la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona es su orientación, dado que esta es perfecta si se considera que el sol sale por el este y se pone por el oeste, es decir, su instalación fotovoltaica podrá recibir todas las horas de sol existentes en el día.

La línea que une la estación Madrid-Atocha con Barcelona-Sants tiene una longitud en vía doble de 621km. Como se puede observar en la imagen 15 la infraestructura de esta línea permite la conexión mediante la Alta Velocidad de las cuatro capitales de provincia catalanas entre ellas y con el resto de España. La línea Madrid-Barcelona es el eje vertebrador del Corredor Noreste, considerado el tercero más importante en materia de transporte para la Comisión Europea. Además también constituye parte del Corredor Ferroviario Mediterráneo en su tramo entre la Frontera Francesa y Tarragona.

La zona donde mayor rendimiento de la instalación se va a ver reflejado es en el tramo Zaragoza-Lleida, concretamente en la comarca aragonesa de los Monegros.

Esta zona se encuentra a 368km de Madrid-Atocha y a escasos 50 km del viaducto del Ebro de 546 metros de longitud que se encuentra situado en el trayecto Zaragoza-Lleida en el término municipal de Osera. Esta zona será considerada como una de las más importantes de la LAV Madrid-Barcelona por las siguientes características:

- Irradiancia solar pudiendo alcanzar los 5.1 kWh/m² en verano
- Extensos taludes en desuso con una perfecta inclinación, cercanos a la línea con el fin de disminuir al máximo las pérdidas por transporte.
- Cercanía a la SET de Peñalba con el fin de ahorrar la mayor cantidad de cableado posible.

No obstante, uno de los inconvenientes de esta zona es que dado su naturaleza montañosa existen ciertas áreas en la que los desmontes poseen una pendiente muy elevada que puede resultar contraproducente como se argumentará en el apartado de conclusiones y aportaciones tras las valoraciones realizadas



Ilustración 15 Esquema de la LAV Madrid- Barcelona con sus correspondientes paradas

La frecuencia de paso de los trenes en circulación en servicio AVE Madrid-Barcelona servidos con trenes serie 103 es de 53 trenes al día, repartidos en 26 trenes descendentes Madrid-Barcelona y 27 ascendentes Barcelona-Madrid. El servicio comercial se desarrolla entre las 6 de la mañana y las 12 de la noche aproximadamente.

El suministro energético de estos 621km proviene de 13 subestaciones de tracción (SET) situadas en: Villaverde Bajo, Anchuelo, Brihuega, Medinaceli, Terrer, Rueda de jalón, Feria de las Muestras, Zaragoza, Peñalba, Lleida, L'Espluga, La Gornal y Sant Boi. En general, cada una de las SET cuenta con dos transformadores de AT/MT, es decir, cada cantón está alimentado por dos grupos transformadores rectificadores de tracción, como se puede ver en la ilustración 16. De este modo, la alimentación de la línea es bilateral, o sea que el tren recibe su corriente de las dos subestaciones que le rodean.

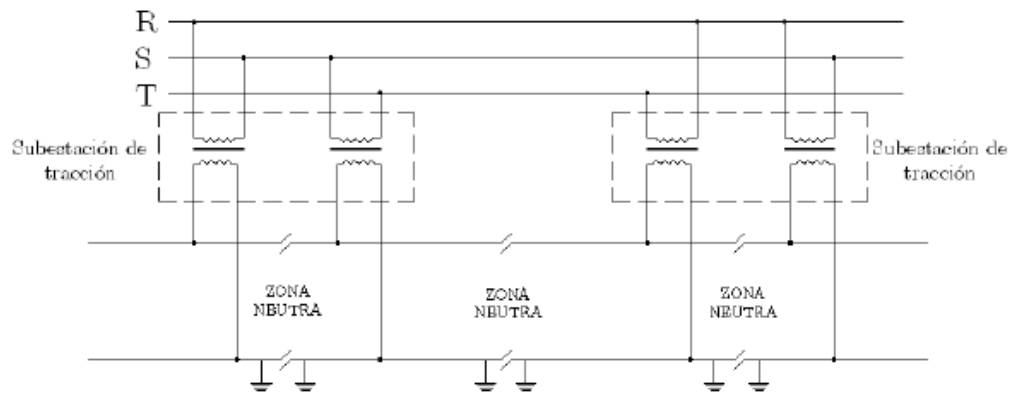


Ilustración 16 Conexión de la catenaria y la red a través de las SET

El consumo de los trenes AVE Serie 103 (ver imagen 17) que suelen dar servicio en la línea Madrid-Barcelona (en gran medida) se sitúa en torno a los 11003,39 kWh a la velocidad de 300km/h, es decir, de media en general en torno a los $17,72 \text{ kWh/km} \left(11003,39 \frac{\text{kWh}}{621\text{km}} \right)$. Con esto se puede establecer que la energía demandada por tren y trayecto es de 1003,39 kWh.

Este tren dispone de 404 plazas en composición simple y además, también posee freno regenerativo que permite suministrar la energía necesaria para abastecer a los equipos auxiliares.



Ilustración 17. Tren S-103 en servicio AVE Barcelona-Madrid, a su paso por Sant Sadurni d'Anoia. Obsérvese la gran superficie de talud aprovechable en este punto de la línea.

La cantidad de la energía final importada en pantógrafo (11003,39 kWh) se ha calculado mediante el método del balance energético en el conjunto del recorrido de la línea.

Aunque este método no da un resultado tan exacto como el modelo de integración, es un procedimiento bastante fiable ya que constituye la base del método de integración. Además se puede emplear ya que para nuestro cálculo se requiere un valor global.

Con el modelo de balance de energía no se divide el recorrido en pequeños diferenciales para los que se calcula la energía en cada sección, sino que el cálculo del consumo total se obtiene en todo el recorrido usando el sumatorio de fuerzas y las ecuaciones del M.R.U.A (es esto último lo que puede llevar a acumular ciertos errores). Ver anexo 1 para identificar el valor de los parámetros intermedios requeridos para la obtención de la energía final que debe ser importada en el pantógrafo por cada uno de los trenes serie 103 que circulan a lo largo de la línea.

Por tanto, el consumo energético de un viaje es de 11003,39 kWh y la potencia media de 17.72 kWh/km. Si se multiplica este dato por el número de trenes que discurren por la línea

se obtiene que el consumo energético diario E_d es igual a 583.179,67 kWh/día $\left(\frac{11003,39kWh}{tren} * \frac{53tren}{día}\right)$ y por tanto E_a es 212.860.579,6 kWh/año $\left(\frac{583.179,6kWh}{día} * \frac{365días}{año}\right)$

En la tabla 2 a modo resumen se exponen los valores de los parámetros de la línea ya descritos en el presente apartado.

PARÁMETRO	VALOR
Tiempo por trayecto	2,75 h (2h45min)
Tipo de tren	Siemens Serie 103 de Renfe Operadora
Distancia de la línea	621km
Energía importada en pantógrafo	11.003,39 kWh
Potencia Media	4001.23 kW
E_d	583.179,67 kWh
E_a	212.860.579,6 kWh

Tabla 2 Parámetros de la LAV Madrid-Barcelona

1.2.2. Planteamiento de soluciones tipo

En este epígrafe se van a establecer algunas posibles soluciones para los distintos tipos de superficie que se han expuesto en el apartado 1.1.4.

En primer lugar, se debe señalar que para establecer cualquier tipo de instalación en las explanaciones de ADIF se ha de respetar:

- El gálibo fijado por norma: Para una línea de alta velocidad de 350km/h la anchura recomendada para la plataforma (L) es 13,3m y la distancia del eje de la vía al poste de catenaria (D) es 3,10m (ver ilustración 18 para localizar los parámetros citados). Además en ningún caso, la instalación planteada podrá interferir en el relleno de la plataforma (ver imagen 19), es decir, el espacio libre comenzaría a partir del final del relleno de esta última.

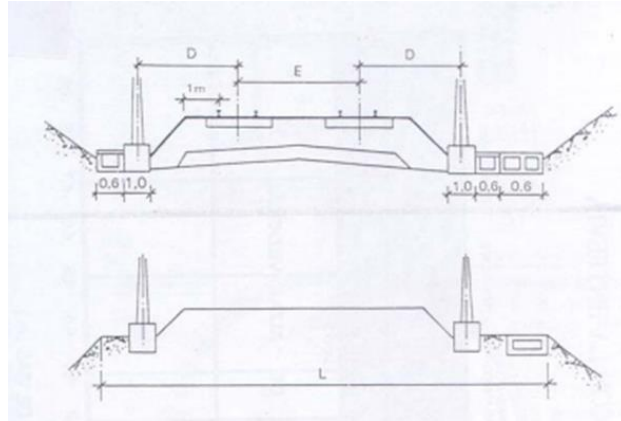


Ilustración 18 Gálbo fijado por norma en una LAV



Ilustración 19 Plataforma, pequeño desmonte y superficie horizontal de la LAV Madrid-Barcelona a unos 20 km del río Cinca

- La escorrentía, drenaje y canalización de las aguas. Tanto los desmontes como terraplenes no dejan de ser zanjas y depósitos en el terreno que frenan la continuidad del mismo. De modo que, para la implantación de las placas solares se debe tener muy en cuenta el diseño implantado con el fin de evitar la escorrentía libre superficial, esto es, la instalación debe respetar una cierta distancia con respecto a los correspondientes sistemas de drenaje superficiales o canalizaciones de flujo como muestran las siguientes imágenes 20 y 21:

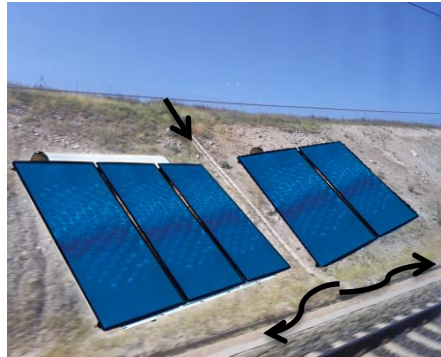


Ilustración 20 Ejemplo de instalación de panel solar en desmonte respetando el sistema de drenaje y escorrentía



Ilustración 21 Ejemplo de drenaje en un desmonte de elevada inclinación

- Morfología de los taludes. Para una línea de alta velocidad se suele cumplir una inclinación típicamente de 3H:2V en taludes de relleno y en taludes de excavación de 2H:1V.

Otras zonas sobre las que se podría instalar esta tecnología son aquellas cercanas a los accesos de los túneles en las que se definen también pendientes de 2H:1V.

Por tanto, es muy importante que la instalación de placas fotovoltaicas cumpla con las características mínimas impuestas por los desmontes y terraplenes sobre los que se quiere instalar, ya que la pendiente de estos se eligió en el momento de su diseño de acuerdo al tipo de suelo, elementos de seguridad y paisajísticos propios de cada zona.

Además de poder hacerlo el coste económico de la instalación aumentaría mucho más que si sólo se acondiciona superficialmente la zona donde la instalación de paneles fotovoltaicos se va a implantar.

Teniendo en cuenta las partes de los terraplenes, se debe señalar que para la colocación de las placas solares sólo se emplea la zona del espaldón (ver apartado 1.1.4.), es decir, sólo se usa la parte exterior del relleno que actúa como protección del núcleo ante agentes externos. Como ya se ha comentado, los taludes tanto de relleno como de excavación tienen una determinada inclinación que no debe modificarse por la justificación expuesta. De modo que al colocar los módulos solares, estos van a tener como mínimo las inclinaciones de los taludes, es decir, el ángulo de inclinación de los paneles podría ampliarse en caso de requerirlo mediante la estructura-soporte que las sostiene.

Para el caso tanto de desmontes como terraplenes los paneles han de ser fijos y una vez fijos la mejor solución en España, a ser posible, es colocarlos hacia el sur y con una inclinación de 45° ya que de esta manera se consigue un mejor rendimiento anual, aunque si bien es cierto ese valor puede modificarse según la latitud de la zona en la que esta instalación se coloque.

En las explanaciones de ADIF no sólo se disponen de terraplenes y desmontes sino que en ciertas zonas existen superficies horizontales, como puede ser el caso del espacio existente entre el final de la plataforma y el comienzo de un desmonte (ver ilustración 22) o entre el final del terraplén y el vallado existente a lo largo del trazado de la línea.



Ilustración 22 Superficie horizontal seguida de desmonte en un tramo de la LAV Madrid-Barcelona concretamente entre Calatayud y Zaragoza

En ocasiones también pueden existir superficies horizontales sin la presencia de desmonte o terraplén, es decir, desde el final de la plataforma hasta el cercado de la línea ferroviaria como se puede observar en la ilustración 23.



Ilustración 23 Zona horizontal continua en la zona de los Monegros de la LAV Madrid-Barcelona comprendida entre Calatayud y Barcelona

En estos terrenos planos la inclinación no es un problema ya que con las estructuras de apoyo de los paneles se puede posicionar cómo más rentable sea dependiendo de la zona. Aquí se podría hablar de paneles orientados constantemente al sol movidos por seguidores solares, pero si bien es cierto, esta tecnología plantea muchas dudas en su análisis beneficio-coste, es decir, estos sistemas de seguimiento no se consideran muy eficaces. Es por esto que incluso en superficies horizontales, el mejor rendimiento se consigue con placas fijas orientadas al sur y con una inclinación de 45° aunque este último valor podría variar en función de la latitud exacta del punto de la línea en la que se coloque.

Por último, resaltar que una última zona muy útil también para la distribución de placas solares que puede ser vista en la LAV Madrid – Barcelona son los espaldones de los pasos inferiores o superiores.

La superficie de paneles solares fotovoltaicos a instalar, siempre que se pueda, debe ser la adecuada para satisfacer al menos gran parte de las necesidades anuales de la LAV escogida. Hay que evitar en la medida de lo posible conseguir la menor cantidad de energía excedentaria al acabar el período de facturación ya que esta no podrá ser recuperada tras el mismo y tampoco tendrá ninguna contraposición económica (a no ser que se propusieran baterías cada cierta distancia a lo largo de la línea, no obstante, para el estudio en cuestión no se considerará esta opción). De modo que, aplicando la expresión:

$$S_{FV} = \frac{\sum_{i=1}^{365} E_{c,i}}{\eta * \sum_{i=1}^{365} I_i}$$

Donde

- $E_{c,i}$ es el consumo energético del día i para los 365 días del año. Para hallar este sumatorio se ha considerado constante el consumo energético a lo largo de todos los días del año, es por esto que se ha tomado para dicho sumatorio el valor del consumo anual en la línea.
- η es el rendimiento del módulo solar
- I_i es la irradiancia en el día i . Este sumatorio se ha realizado mediante una media de todos los valores obtenidos a lo largo del año para la LAV Madrid-Barcelona (extraído de ilustración 10) el cual se ha considerado constante y se ha multiplicado por los 365 días del año.

La superficie teórica total a instalar es de 670.128,18 m²

Para satisfacer las condiciones de la superficie expuesta y aprovecharla al máximo, se van a escoger módulos de 72 células de silicio de 17.7% de rendimiento, 250W de potencia pico y 1.94 m² de superficie aproximadamente. No obstante, las placas no dejan de ser modulables por lo que éstas pueden adaptarse a la zona sobre la que se quiere implantar. A continuación en la tabla 3, se expone un resumen de las características de la instalación y propiedades de los módulos fotovoltaicos

Características de la instalación FV	
Consumo diario de energía (E_d)	583.179,67 kWh
Consumo anual de energía (E_a)	212.860.579,6 kWh
Irradiación media diaria (I_i)	4.92kWh/m ²
Rendimiento de los módulos	0.177
Coste del vatio pico instalado	1.8 €/W _p
Superficie en desuso a emplear (S_{FV})	670.128,18 m ²
Propiedades de los módulos FV	
Superficie del módulo (A_m)	1.956mx0.992m =1.94m ²
Vatio pico por módulo	250W _p
Vatio pico por metro cuadrado	128.87 W _p /m ²

Tabla 3 Características de la instalación y propiedades de los módulos fotovoltaicos

De acuerdo a esto, se puede establecer un conjunto de soluciones en función de la de la magnitud de la superficie:

- En superficies horizontales se requieren instalaciones modulares de 15 a 25 m² por cada kW demandado que serán apoyadas sobre estructuras monoposte.



Ilustración 24 Estructura monoposte adecuada para superficie horizontal

- Para las zonas de desmorte o terraplén en las que no interese aumentar el ángulo de inclinación o se desee hacerlo en una magnitud muy reducida se van a instalar conjuntos modulares de 8 a 10 m² por cada kW todo ello sobre una estructura coplanar o con triángulo inclinado.



Ilustración 26 Superestructura de panel con triángulo



Ilustración 25 Apoyo panel solar tipo coplanar

La elección de un tipo de solución u otro va en función de los tipos de esfuerzos que pueden soportar las estructuras en la zona sobre la que se implanten (peso de los módulos, empuje del viento, peso de la nieve que se pueda depositar sobre los módulos, peso y efectos del hielo, dilataciones térmicas...)

Las placas, en todo caso y siempre que se pueda, como ya se ha comentado deberán llevar orientación sur (admitiendo variaciones de 20° hacia el este o el oeste) y una inclinación entre 20° y 45°

Estas soluciones planteadas son sólo un mero ejemplo de proceder extensible a la LAV Madrid-Barcelona y al resto de líneas de alta velocidad, siempre y cuando se haya realizado un análisis previo del diseño de la superficie existente, es decir, siempre y cuando los estudios para la implantación de la instalación descrita cumpla con las limitaciones de las posibles superficies de implantación, como es el caso de: respetar canaletas o tuberías en talud para drenajes, valorar la posibilidad de establecer accesos para la operación y mantenimiento de esta nueva instalación mediante la construcción de escaleras metálicas, de hormigón entre los huecos existentes entre módulos, respetar los espacios mínimos necesarios para realizar el mantenimiento de la vía sin poner en riesgo la instalación de generación solar y, también de forma muy importante, respetar las necesidades de caminos de acceso para evacuación de viajeros en caso de incidencia en la línea.

1.2.3. Tipo de electrificación y tratamiento de la energía

En este apartado se exponen los posibles sistemas de alimentación de las líneas de Alta Velocidad en España para satisfacer la conexión entre la catenaria y la zona de generación eléctrica renovable

Los principales elementos de la electrificación ferroviaria que se encargan de hacer funcionar a los sistemas de tracción eléctrica son: las fuentes de generación de energía eléctrica, las líneas de transporte, las subestaciones, la línea aérea de contacto (LAC) y sus sistemas asociados, los feeders de alimentación (conexión Subestación -LAC) y por último todos aquellos elementos pertenecientes al tren que se encargan de recibir dicha energía (pantógrafos, motores eléctricos...)

Además de todo este **conjunto de elementos** se deben mencionar aquellos de los que se compone cualquier **sistema eléctrico de corriente alterna**.

El **sistema de transporte** encargado de llevar elevadas potencias desde los centros de carga a las líneas primarias de distribución (para el consumo de las compañías ferroviarias) se compone principalmente de: estaciones transformadoras que elevan la tensión de salida de la central generadora, líneas de transmisión (ya citada), estaciones de maniobra y conjunto de transformadores reductores.

Por su parte, el **sistema de distribución** se suele reducir (en la inmensa mayoría de las líneas ferroviarias) a las propias líneas de transporte, sin considerarse ni los transformadores de servicio ni las líneas secundarias que se deberían tener en cuenta en cualquier sistema eléctrico alterno. Estas líneas de transporte pueden ser instaladas por cuenta propia, interconectando las subestaciones rectificadores con las zonas de suministro de las fuentes (para el caso de corriente continua) o por el contrario pueden ser propiedad de la Red Eléctrica Española (para el caso de corriente alterna como las Líneas de alta velocidad).

Hoy en día para el transporte de energía, se emplean elevadas tensiones porque para una potencia constante, a medida que aumenta la tensión disminuye la corriente y con ello las pérdidas. Esto es posible (especialmente en corriente alterna) gracias a la existencia de grandes alternadores y transformadores que se encargan de elevar y reducir dicha tensión.

Para este estudio solamente se emplearán **sistemas de corriente alterna (propios de las líneas ferroviarias de Alta Velocidad)**, es por esto que se exponen las instalaciones propias de estos últimos.

- Subestación trifásica de alimentación: Esta subestación no forma parte del gestor del ferrocarril (como ocurre en el caso de los sistemas corriente continua) sino que constituye un conjunto independiente cuya competencia corresponde a la empresa suministradora. Al gestor sólo le corresponden los equipos de medida para el tema de la facturación. Los elementos que la forman son:
 - Equipos de seguridad del suministro (protecciones, seccionadores...) pertenecientes a la empresa suministradora.
 - Sistemas coordinación de protecciones y telemando.
- Subestación de tracción (SET): la red trifásica de alta tensión a través de esta subestación alimenta cada uno de los tramos que componen la línea, es decir, suministra la energía a los trenes. Estos tramos cortos sin alimentación que separan la línea en secciones eléctricamente separadas reciben el nombre de zonas neutras y

su ubicación suele ser en llanos para que el tren no pierda excesiva velocidad en dicho tramo. En la ilustración 28 se muestra la conexión de una SET a catenaria. Uno de los principales elementos de esta subestación es el transformador de potencia reductor formado generalmente por:

- Un circuito primario con un alta nivel de tensión (en torno a 220-132kV) compuesto por aparellaje bipolar de potencia.
- Un circuito secundario con un nivel de tensión de 50kV equivalente al sistema 2x25kV (ver imagen inferior) propio de las líneas de Alta Velocidad.

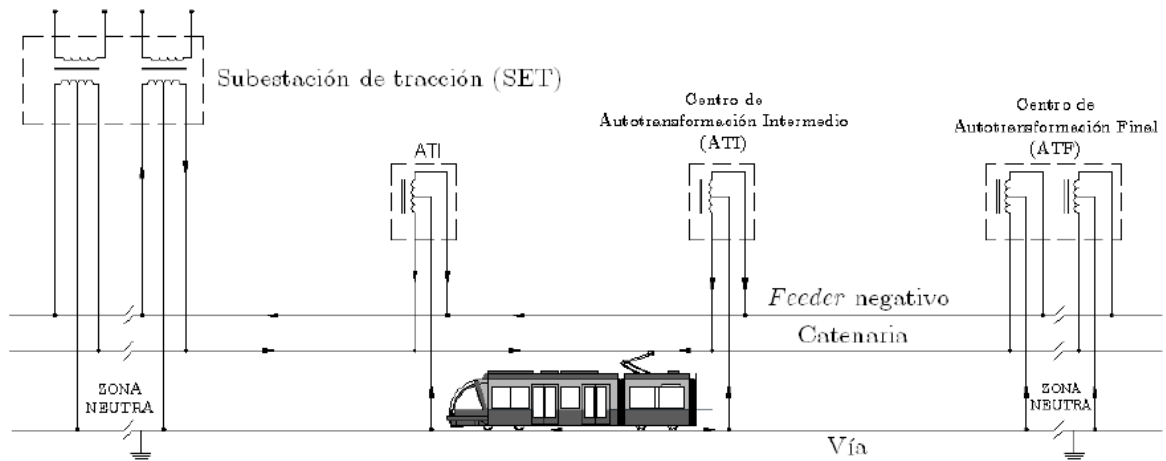


Ilustración 27 Conexión sistema 2x25kV Corriente Alterna

En esta última imagen se puede identificar el feeder de alimentación, también llamado feeder de refuerzo. Este cable permite alimentar a un determinado punto de la LAC desde la SET, es decir, conecta el transformador y la catenaria. En general, esta conexión se realiza a una elevada distancia de la subestación eléctrica, por tanto, suele acompañar a la catenaria durante algunos kilómetros.

Una gran ventaja que posee el feeder es que hace disminuir la intensidad por la catenaria, lo cual se traduce en una disminución de pérdidas de energía y caída de tensión medida desde la subestación. Estos sistemas absorben la tensión alterna de la red transformada en otros valores menores pero sin existir conversión de un tipo a otro de corriente.

Algunos de los elementos que integran la instalación eléctrica de la línea de Alta velocidad escogida (Madrid-Barcelona) y pueden observarse en la ilustración 29 son:

- 38 Centros de Autotransformación que transforman de 50 kV a 25 kV
- 13 Subestación de tracción AT de 50 kV
- Feeder negativo (-25 kV), tipo LA 280 de 281,1 mm²
- Catenaria tipo C-350 con sustentador e hilo de contacto. Donde la altura del hilo de contacto es de 5,3 m medida entre el hilo de contacto y el carril de rodadura existiendo una desviación máxima del hilo de contacto de 0,4 m.

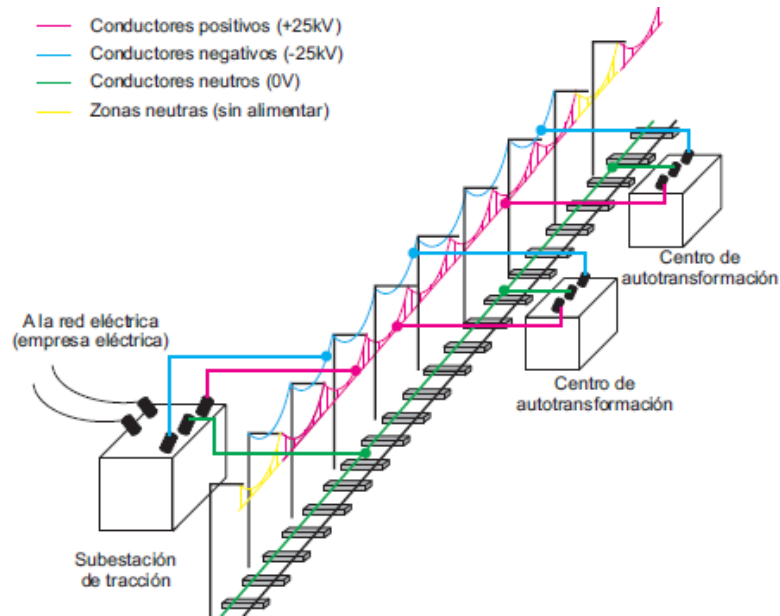


Ilustración 28 Esquema de conexionado de subestación de tracción a catenaria

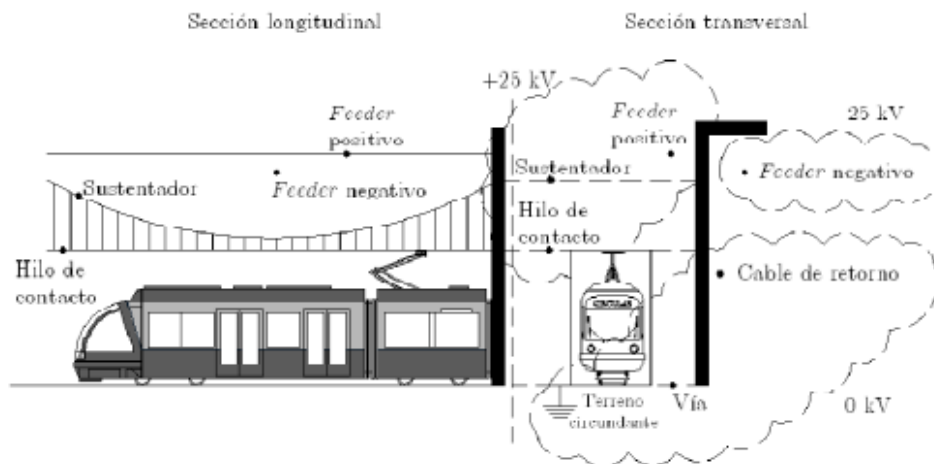


Ilustración 29 Configuración del sistema de tracción

1.2.4. Exposición conceptual del conexionado de red

Una vez que se ha expuesto el esquema básico de electrificación de una línea de Alta Velocidad, es posible decidir qué tipo de conexionado se debe realizar en la línea Madrid-Barcelona incorporando paneles fotovoltaicos a lo largo de ciertas zonas del trazado de la misma.

Con la idea expuesta en este estudio lo que se pretende es que las empresas ferroviarias (en este caso la dueña de la infraestructura –ADIF-) sean propietarias de las “centrales” generadoras de energía renovable y con ello de su energía producida, es decir, que al menos parte de la energía que consume no tenga que ser contratada a las empresas suministradoras de electricidad; sino que sean ellas mismas las que generen la máxima energía posible contratando sólo la restante para el normal funcionamiento de los sistemas de tracción eléctrica en el caso que fuera necesario.

Concretamente el ámbito de aplicación propuesto (Línea de Alta Velocidad Madrid-Zaragoza-Barcelona) se compone de 13 subestaciones eléctricas de tracción (2x25kV) donde cada una alimenta a dos vanos con zonas neutras y posee 38 centros de auto transformación asociados. Debido a esto, no se podría suministrar toda la energía generada en un punto, ya que de ser así sólo se estaría inyectando energía en uno de los vanos de la línea, es decir, no se puede escoger un punto cualquiera de la catenaria para suministrar la energía generada tanto mediante la SET como por la “central renovable”.

Por ello, se debe satisfacer una correcta interconexión entre la catenaria y la “central renovable”. Una de las opciones es hacer que esta tecnología, cada cierta distancia, sea capaz de inyectar la energía a la catenaria mediante la implantación de pequeñas subestaciones. La otra opción, más viable económicamente y con la que se trabajará en el presente trabajo, sería instalar una línea de Media Tensión (MT) que recorra toda la distancia existente entre la zona de generación a lo largo de la línea y cada una de las subestaciones existentes en la misma de modo que se haga llegar la energía generada a una de las 13 SET más cercanas.

Estas zonas de generación a lo largo de la línea son consideradas como pequeñas centrales eléctricas compuestas por instalaciones de energía solar fotovoltaica. En este caso se

pretende adaptar estas instalaciones a la infraestructura ferroviaria es por ello que se debe incorporar una pequeña instalación eléctrica nueva, pasando a tener dos instalaciones eléctricas diferenciadas. Por un lado, la habitual línea de suministro de energía eléctrica con sus medidores y protecciones correspondientes (propiedad de la empresa suministradora de energía) y, por otra parte, la SET con todo lo que ello conlleva junto la nueva instalación solar fotovoltaica instalada con todos sus elementos y equipamiento eléctrico relacionado con el control, interconexión y medición (propiedad de ADIF).



Ilustración 30 Instalación al fondo que abastece la SET del Anchuelo (una de la LAV Madrid-Barcelona) propiedad de REE



Ilustración 31 Parte de la SET del Anchuelo propiedad de ADIF

Como se ha descrito en el apartado 1.1.5, instalación solar fotovoltaica conectada a la red se compone de tres elementos básicos: el grupo de placas solares fotovoltaicas instaladas en los taludes o terreno en desuso de la infraestructura ferroviaria, un ondulator o inversor-conversor electrónico conectado en serie con estas últimas y un cuadro de interconexión con la red eléctrica comercial. Por su parte, los módulos se componen internamente de células conectadas en serie para aumentar la tensión al valor deseado y en paralelo para conseguir la corriente que se requiera.

En función de la potencia generada conviene utilizar uno u otro sistema de conexionado. Para sistemas de hasta 5KW, es decir, instalaciones puntuales pequeñas, se puede inyectar la corriente generada en BT 230V AC monofásica. Este sería el típico caso de instalaciones ubicadas en edificios técnicos o estaciones, instalaciones que están perfectamente desarrolladas por la ingeniería de la edificación actual y que, por lo tanto, no son objeto del presente TFM.

Para el caso de estudio, en el que se van a tener bloques o unidades de generación de más de 5KW, la conexión más eficiente es una conexión trifásica AC. Por lo tanto, ya queda definido un parámetro fundamental del bloque elemental de generación de potencia: tendrá una potencia útil de salida superior a 5KW y deberá tener una salida final en corriente alterna trifásica. Además, destacar que las células se conectarán en serie para aumentar la tensión al valor deseado y en paralelo para conseguir la corriente que se requiera.

Definido este punto, se aborda a continuación el modo de transporte e inyección a la subestación de tracción de la corriente generada.

Una vez producida la energía por parte de las placas, esta pasa a los inversores. Una vez que la corriente continua ha sido transformada a corriente alterna resultaría útil que cada cierta distancia fuera controlada por un conjunto de seccionadores en lugar donde se encuentran ubicadas las placas, es decir, interesa integrar un pequeño armario de corte local para un determinado conjunto de placas, con el fin de poder controlar parte de la instalación sin que la subestación tenga que interceder en la maniobra; beneficiando todo ellos a las tareas de mantenimiento de las misma. De este modo, la subestación detectaría simplemente una falta de corriente por parte de la instalación solar exigiéndole más energía al grupo transformador para abastecerla. Por tanto, durante el mantenimiento mediante un mando local se podría establecer el corte en una determinada acometida de las placas y quedando dicha zona alimentada de la energía proveniente de la empresa suministradora.

A partir de este punto, la energía es reconducida a una línea aérea de transporte de media tensión, la cual lleva la energía hasta la salida del transformador de la subestación de tracción más cercana. A continuación, los elementos de medida, corte y sistema de telecontrol necesarios (seccionador automático –contactor magnetotérmico- y diferencial, contadores, seccionador manual y fusibles) serán los encargados de evaluar la cantidad de energía recibida, cualquier fallo o falta en el sistema, demandar la energía restante a la

subestación y una vez y todo esto se encuentre evaluado se procede a realizar la conexión a la catenaria.

En ocasiones, es posible mediante la adquisición de datos recibida por parte de los sistemas de seguridad, controlar o telemandar de forma externa a toda la instalación de campo cualquier posible error o fallo que pueda producirse en el proceso.

A continuación se expone un esquema con el proceso simplificado que debería seguir la energía desde su producción hasta su utilización en la catenaria

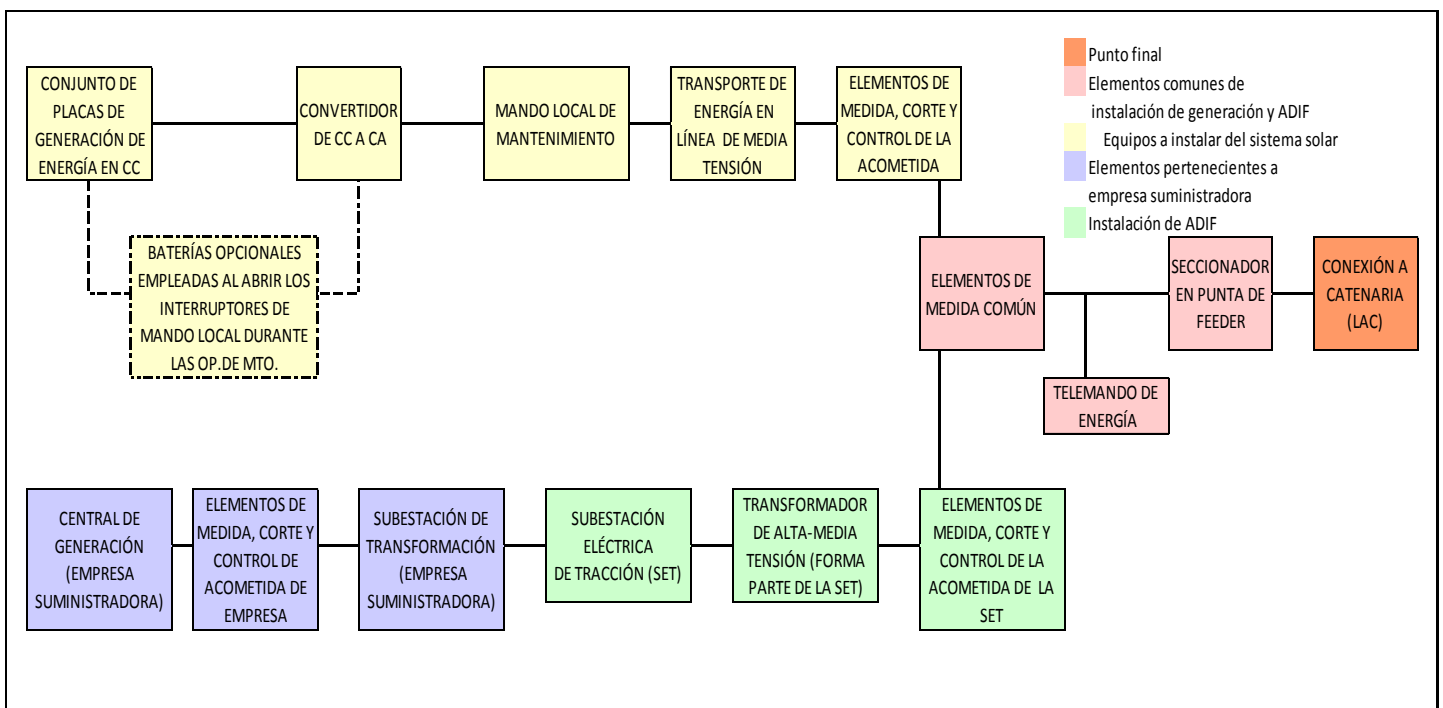


Ilustración 32 Esquema global de conexionado de la nueva instalación y la existente

Para esta nueva instalación, es posible emplear el sistema de telecontrol de la subestación de tracción siempre y cuando se integren todos los equipos necesarios para controlar el sistema de los módulos. El resto de seccionadores (los que van a punta de catenaria o salida de transformadores podrían emplearse quedando inalterados). Por su parte, el software de telemando existente en la subestación de tracción podría también emplearse incorporando una pequeña ampliación del mismo en la que se incorpore un nuevo conjunto de datos a controlar (cantidad de energía a la entrada y salida de la línea de media tensión).

Los armarios de protecciones y / o cuadro de conexiones tienen la función de incluir los instrumentos de medida de la energía producida y consumida, así como las protecciones eléctricas (dispositivos de acción automática) que pide la normativa vigente. Estos elementos de protección pueden duplicar los que ya incorporan los mismos inversores en su diseño, con el fin de evitar tanto los daños a la red eléctrica como la perturbación de la producción solar y también los daños que el mismo sistema pueda producir en el equipamiento interconectado y al resto de elementos de la subestación.

En resumen la interconexión de todo el sistema se puede resumir en:

- Interconexión de módulos.
- Conexión de los módulos hasta los inversores cuyo voltaje de trabajo para la instalación escogida se sitúa en torno a los 600V.
- Transporte de energía mediante la línea de media tensión
- Conexión de los inversores al cuadro de protecciones de la subestación y contadores de energía, es decir al sistema de telecontrol global (salida de la subestación y salida de la línea de transporte de media tensión).
- Punto de conexión a catenaria.

Todo ello tomando las medidas oportunas en la instalación para que minimizar las pérdidas derivadas de la conexión tanto en la parte de CC como en la de CA

En conclusión toda esta energía producida ha de ser contabilizada e inyectada a la catenaria para que el consumidor (en este caso ADIF) la consuma al paso del material rodante por esa zona.

Por tanto para el caso de estudio que se propone, el propietario de la infraestructura ferroviaria y por tanto de la instalación solar pasa a ser por un lado, una central generadora que consume la energía que el mismo produce y por otro de forma complementaria, un consumidor de energía eléctrica de la empresa suministradora.

1.3. BALANCE ECONÓMICO

1.3.1. Coste de implantación

El coste de la instalación de las placas fotovoltaicas puede desglosarse en las siguientes proporciones:

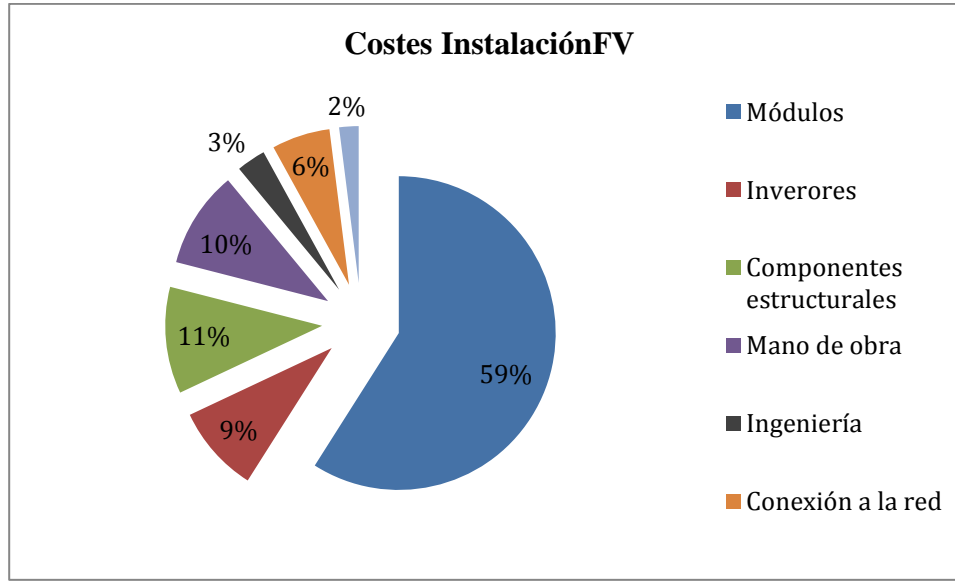


Ilustración 33 Desglose de costes de la instalación Fotovoltaica

En el desglose de precios de la instalación (ilustración 33) se puede observar el precio de los paneles, los inversores de CC –CA, la mano de obra de la instalación de los mismos y el conexionado mediante su correspondiente cableado. De acuerdo a la Asociación Industrial Europea Fotovoltaica el coste de la instalación asciende hasta los 1.8€/W_p (Vatio- Pico) y según la media la adquisición de los mimos supone 0.44€/Wp (como ya se exponía en la tabla 3 del punto 1.2.2)

Los valores relacionados con la instalación y las características de los módulos son los siguientes:

Como ya se ha señalado en el apartado 1.2.2 *Planteamiento de soluciones tipo*, si cada módulo escogido posee una media de 250 Wp y este mide aproximadamente 1.94m² se puede decir que cada módulo puede llegar a generar 128.87 Wp/m² del mismo

$$\left(\frac{250\text{Wp}}{\text{modulo}} * \frac{\text{modulo}}{1.94\text{m}^2} = 128.87 \frac{\text{Wp}}{\text{m}^2} \right)$$

Además, el coste total del sistema de implantación se compone de:

- Coste de adquisición de los módulos fotovoltaicos asciende a **56.67 €/m²**

$$\left(\frac{0.44\text{€}}{W_p} * \frac{128.87W_p}{\text{m}^2} = \frac{56.67\text{€}}{\text{m}^2} \right)$$

- Coste de adquisición de módulos si se incluyen los costes de instalación además de la adquisición asciende a **231.97€/m²**

$$\left(\frac{1.8\text{€}}{W_p} * \frac{128.87W_p}{\text{m}^2} = \frac{231.97\text{€}}{\text{m}^2} \right)$$

Nota: Para el cálculo global de la instalación se tendrá en cuenta este último valor en el que se incluye el coste de instalación.

- Coste de construcción de la línea de media tensión (MT) para transportar la energía generada a la salida de los transformadores de las subestaciones de tracción. Este valor puede fluctuar mucho de acuerdo al trazado de la línea. Además, los terrenos por los que circula la línea se encuentran equipados con los postes requeridos para la instalación aérea de la línea de MT es por esto que se puede establecer que el precio de la misma, considerando el montaje y el suministro, asciende a unos **4.500€/km**
- Coste de operación y mantenimiento(O&M) o costes de ciclo de vida de la instalación. Las placas solares para la generación de energía son una tecnología relativamente reciente por lo que es difícil un cálculo de costes de mantenimiento a largo plazo. Si bien es cierto, publicaciones de referencia apuntan que estos se sitúan en torno al 0.7% del coste inicial de la instalación.

En este coste se engloban diferentes labores de mantenimiento necesarias para el perfecto funcionamiento de la instalación solar fotovoltaica. En la siguiente figura se muestran los costes O&M en los que se incurre con la solución propuesta y que ADIF como propietario de toda la infraestructura deberá abordarlos anualmente y ascienden a una cuantía de **1,624€/m²**.

Hay que recordar que el gasto de mantenimiento se incrementa con los años pues la instalación envejece. Sin embargo, para un correcto análisis se han repartido por igual los costes a lo largo de los 25 años de vida de la instalación (tiempo que el

fabricante asegura un funcionamiento óptimo ya que tras este periodo de tiempo las células empiezan a degradarse y trabajan al 80% de su capacidad inicial.)

En la ilustración 32 se puede apreciar que los inversores consumen un 15% del presupuesto de mantenimiento pues su vida útil es muy inferior a las de los módulos solares. Para ver el coste desglosado más en detalle de la operación y mantenimiento de las placas consultar Anexo 2

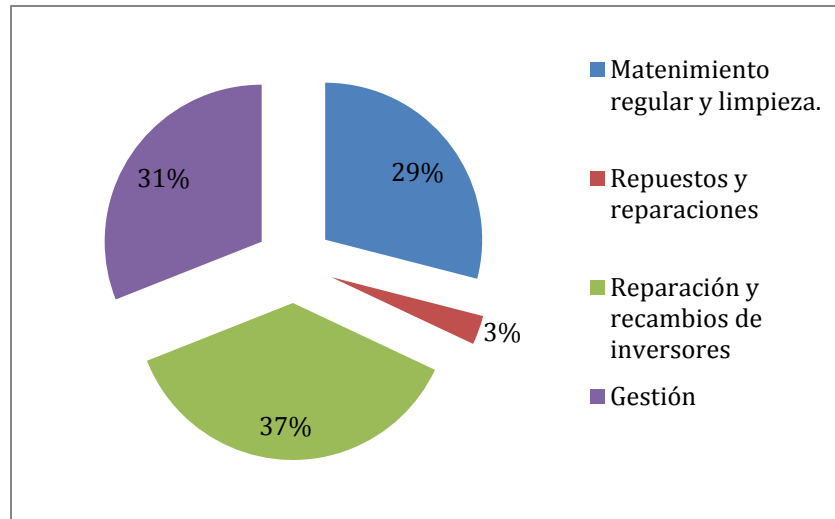


Ilustración 34 Desglose de costes de Operación y Mantenimiento de la instalación

- Coste por las tasas del seguro contratado para cubrir posibles pérdidas en la generación eléctrica o desperfectos de la instalación. Este coste supone un 0.2 % de los costes iniciales de la instalación, es decir, alrededor de **0.464 €/m²**

Por tanto, si se suma todo este conjunto de valores (excepto el mantenimiento y las tasas del seguro contratado) se tiene que el coste total del sistema para la línea escogida asciende aproximadamente a 155.442.150 €

$$\left(231.97 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} * 670.128,18\text{m}^2 = 155.442.150 \text{€} \right)$$

En la siguiente tabla se muestra un cuadro-resumen con los resultados de la instalación implantada:

Superficie en desuso a emplear, S_{FV}	670.128,18 m ²
Superficie de los módulos, A_m	1.94m ²
Nº módulos necesarios, $n \left(\frac{S_{FV}}{A_m} \right)$	345.427 ud
Vatio pico por módulo	250Wp/ud
Potencia nominal instalada, $P_n (W_p * n)$	86.356.750Wp
Precio de adquisición de módulos, P_{adq}	0.44€/Wp
Coste de adquisición del sistema, $C_{adq} (P_{adq} * P_n)$	37.996.970€
Precio de adquisición módulos incluyendo el resto de costes de su instalación, $P_{adq+sistema}$	1.8€/Wp
Coste de instalación del sistema, $C_{instFV} (P_{adq+sistema} * P_n)$	155.442.150€
Coste Línea MT, C_{MT}	4.500€/km=2.794.500 €
Coste O&M, $C_{O\&M} (0.7\% * C_{instFV})$	1.088.095,05€
Coste seguros, $C_{seguros} , (0.2\% * C_{instFV})$	310.884,3€

Tabla 4 Cuadro-Resumen con los resultados de la instalación a implantar

1.3.2. Consumo y facturación

Para determinar el consumo eléctrico de la línea objeto de estudio se ha realizado una estimación en el apartado 1.2.1. Como ya se comentó, el tren AVE serie 103 que opera en el servicio Madrid-Barcelona tiene un consumo promedio de 17.7 kWh/km y la longitud de la vía es de 621km por lo que el consumo diario se encuentra en torno a 583.179,67 kWh

La instalación fotovoltaica se dimensiona de tal forma que la energía generada por los paneles satisfaga al menos gran parte de la energía diaria demandada. En cuanto a la relación de la energía demandada por la línea y la generada por los paneles solares instalados destacan cuatro casos de funcionamiento:

- El primero se llama, consumo a precio TUR, este caso es aquel donde la energía se consume directamente de la red al precio que tenga establecido la compañía suministradora. Esto ocurre en los instantes en los que la instalación renovable no genera prácticamente nada energía porque no existe suficiente radiación solar.

Normalmente la energía a precio TUR constituye el 7.2% de la energía anual demandada.

- El segundo se denomina consumo instantáneo y tiene lugar cuando la producción eléctrica es superior o igual a la demanda que requiere la instalación lo cual no supondría ningún coste adicional al propietario (ADIF).
- Otro caso es el de energía excedentaria vertida a la red, esto ocurre cuando la potencia generada por las placas solares supera a la consumida por la LAV. Esta energía es aquella que ni ADIF ni la compañía eléctrica recompensan de acuerdo a la normativa vigente hasta el momento.
- Por último, se encuentra la situación en la que el consumo de energía tiene lugar a precio de peaje. Esta situación va a ocurrir en los periodos en los que la energía se consume de la red cuando la producción de la misma por parte del sistema fotovoltaico es inferior a la demandada, siempre y cuando parte de esta energía producida se ha llegado a suministrar previamente a catenaria o se haya vertido a la red, esto supondrá un coste por almacenamiento incluso gestión de excedentes.

Por tanto, teniendo en cuenta el consumo de energía anual a lo largo de la línea en cuestión y considerando el precio de la energía acordado actualmente para ADIF, se puede conocer aproximadamente el coste de la energía demandada por la línea Madrid-Barcelona.

1.3.3. Rentabilidad y previsión de amortización de la inversión

Una vez conocida la demanda de energía, el establecimiento de placas fotovoltaicas se debe dimensionar como ya se ha definido anteriormente de forma que haga la instalación rentable, es decir, que la energía generada por los paneles solares satisfaga al menos la gran parte del valor de energía diaria demandada. De este modo, cuanto más se asemeje la energía generada a la energía consumida por el tren más ideal será nuestra instalación, es decir, mayor ahorro de energía y nivel de amortización se estará consiguiendo. Considerando estos criterios, en el apartado 1.2.2., ya se ha determinado que esta superficie asciende a 670.128,18 m²; parámetro muy importante que deberá ser considerado para la valoración de la rentabilidad y la amortización de la inversión ya que va a ser el valor que nos proporcione inversión exacta destinada a la instalación.

En la actualidad existen numerosos métodos para el análisis de inversiones, todos ellos, cuentan con ventajas e inconvenientes. Para este caso se va a emplear el indicador conocido como tiempo de retorno o Payback.

Este indicador se corresponde con el número de años en que se la suma de los ahorros iguala a la inversión inicial realizada, viene dado por la ecuación:

$$C_{FV} = \sum_{t=1}^{t=25 \text{ (max amortización)}} AH_{FV}^t \text{ para } t = 1 \dots, 25$$

donde C_{FV} es el coste de la inversión en € y AH_{FV}^t es el ahorro obtenido en la facturación eléctrica en el año t con la instalación renovable.

De modo que la expresión que responde al cálculo de ahorro sería la siguiente:

$$AH_{FV}^t = F_{sinFV}^t - F_{FV}^t$$

donde F_{sinFV}^t es la factura anual sin instalación fotovoltaica y F_{FV}^t la factura anual con la instalación renovable en el mismo año considerado

Por tanto, el tiempo de amortización del coste de la instalación es de 8,5 años. Esto se consigue sabiendo que:

- El coste total de la energía en un año sin instalación fotovoltaica para esta línea es de **20.008.894€**. Sabiendo que la energía anual consumida por la línea escogida es de 212.860.579kWh (ya calculada en el apartado 1.2.1) y el precio por kWh que las empresas suministradoras de energía tienen impuesto al Administrador de la Infraestructura es de 0.094€/kWh

Otra forma de expresar el coste energético que supone el funcionamiento de la línea Madrid Barcelona (aunque menos exacto) es el siguiente: un AVE S103 tiene una potencia de 8800kW y 404 pasajeros. Para 2.75h representan un consumo, si el tren va a tope todo el tiempo, de 24.200kWh (8800kW *2.75h). A un precio de la electricidad de RENFE de 0,094€/kWh representa 2.274,8€ por tren y trayecto, es decir, 5.63€ por pasajero entre Madrid y Barcelona en un día y en total 44.006.006€ en un año.

- El único coste anual con la instalación solar asciende a **1.398.979,35€** proveniente de los costes de O&M (ver desglose de este precio en anexo 2) y de los seguros establecidos

Por tanto, el número de años necesario para que el ahorro (diferencia de precio con módulos solares respecto al coste de energía sin la instalación propuesta, 18.609.914€) supere al coste de la instalación inicial (158.236.650€ -ver anexo 2 para más información-) son **8.5 años**, es decir:

$$t_{amortización} = \frac{C_{inversiónInicial}}{AH_{FV}} [\text{años}]$$

Conviene señalar que para estimar el tiempo de amortización se ha considerado que los costes anuales de la instalación (precio de energía y precio de mantenimiento para el caso de la línea provista de paneles) son los mismos para todos los años.

Existe la posibilidad de considerar una financiación de la instalación propuesta con fondos propios de ADIF. Por ejemplo, sería posible financiar en torno a la mitad del coste total, en torno a unos 77.724.817€

Esta financiación conlleva una consideración de los costes financieros debidos a la cuota anual de amortización. Si dicha cuota es repartida equitativamente por igual durante todos los años del préstamo, se puede emplear la siguiente expresión para conocer la cuota de amortización:

$$C_{amort} = \frac{C_{prop} * i}{1 - (1 + i)^{-n}}$$

Donde C_{amort} es la cuota de amortización del préstamo, n es el número de años del período de amortización del préstamo (considerado 20 años), C_{prop} es el capital propio (considerado el 50% del capital total), i es el Tipo de Interés Nominal (TIN) (considerado del 5% menor pues a partir de abril de 2014 el coste de financiación a más de diez años en España se sitúa por debajo del 4%.)

Por tanto, de acuerdo a lo expuesto, el Coste de amortización sería de 6.236,83€ a lo largo de los 20 años que se ha propuesto

CONCLUSIONES Y APORTACIONES

El uso de la energía solar para la generación de electricidad no solo evita emisiones contaminantes a la atmósfera las cuales son nocivas para el planeta y la seguridad de sus habitantes, sino que también contribuye muy positivamente en el medio-largo plazo por un lado a la economía de las grandes empresas consumidoras de energía eléctrica como ADIF y por otro, a la economía de países como España faltos en fuentes de energía fósiles, aumentando la independencia energética. Con esta independencia se consigue reducir la influencia de los conflictos geopolíticos del momento, los cuales aumentan a medida que disminuyen las reservas y se incrementa la demanda energética a nivel mundial.

El sector de transporte español es el que más energía final por habitante consume de toda Europa y el que mayor consumo energético total posee, por delante de sectores muy intensivos energéticamente como el industrial. Dentro de los diferentes modos de transporte el tren de Alta Velocidad es uno de los modos de transporte interurbanos más eficientes.

España disfrutó y con el tiempo no le quedará más remedio que disfrutar de grandes oportunidades en el mercado de las energías renovables ya que las administraciones públicas hace un tiempo y a partir de ahora deberán conceder garantías especiales para dar peso a estas fuentes de energía en el mix energético español; todo ello causado por el agotamiento de los combustibles fósiles. Al mismo tiempo se ha invertido intensamente en la construcción de vías ferroviarias de alta velocidad apostando por este tipo de ferrocarril como el modelo de comunicación en la Península.

Las energía solar fotovoltaica, por su baja densidad energética, necesitan de gran cantidad de superficie y esto es precisamente lo que abunda en las Líneas de Alta Velocidad. Llegados a este punto merece la pena preguntarse si sería posible alimentar los trenes AVE con energías renovables in-situ, esto es, instalada en los alrededores de la línea.

El primer problema a resolver es la viabilidad económica técnica de la empresa pues cualquier decisión de este tipo lleva asociada una valoración coste-beneficio-oportunidad. Es esto precisamente el objetivo del presente proyecto.

En este documento se evalúa la posibilidad y la rentabilidad de instalar un sistema solar fotovoltaico en la Línea de Alta Velocidad Madrid-Barcelona. Para esto se ha evaluado el marco regulatorio que ha existido y existe. Las conclusiones obtenidas de todo el conjunto del trabajo son las siguientes:

- Con esta tecnología es posible disminuir los 9.5kg de CO₂/ pasajero en un tren de AVE.
- La superficie de paneles FV que se debe instalar para conseguir el máximo ahorro, y por consiguiente, la máxima rentabilidad, debe cubrir como máximo la demanda anual de la instalación o en su caso minimizar al máximo posible factura anual, pues la energía excedentaria que podría ser vertida a la red no recibe compensación económica. Por ello es especialmente importante obtener la cantidad de energía más próxima a la demanda por el sistema.
- El día óptimo del año es aquel en el que la generación de energía mediante los módulos solares comienza a ser igual al consumo de energía por parte del sistema ferroviario. Según la ubicación de la LAV objeto de estudio debe ser el 20 de junio.
- El coste total de adquisición de la solución con energía solar fotovoltaica, instalado y puesta en marcha, asciende a la suma de 158.236.650€ y el coste anual de mantenimiento a 1.398.979,35€, valor que resulta despreciable en comparación con la inversión de los 8.967 millones de euros que supuso la construcción de la LAV Madrid-Frontera Francesa en su tramo central Madrid-Barcelona.
- Se demuestra que la modalidad de autoconsumo propuesta para la instalación solar fotovoltaica propuesta resultaría económicamente viable/rentable para precios del peaje inferiores al 73% de la tarifa TUR obteniéndose un periodo de retorno de la inversión de 8,2 años, en el escenario más favorable.
- En ocasiones, la inclinación de los taludes 3H:2V puede ser perjudicial para la instalación objeto de estudio ya que con ella se evita el atrincheramiento consiguiendo que se produzca la revegetación del paisaje que no está siendo ocupado por la plataforma. Por tanto, luchar con los impactos paisajísticos-visuales e incentivar la revegetación puede ser perjudicial para nuestra instalación lo cual puede traducirse en mayores costes de mantenimiento que podrían hacerla inviable.
- La potencia máxima generada por la instalación fotovoltaica no puede exceder más del 50% de la potencia nominal del transformador de la subestación eléctrica.

Tampoco se aceptarán conexiones de instalaciones que produzcan caídas de tensión provocadas por la conexión-desconexión que sean superiores al 2%.

- Si la subestación de tracción, a la que se debe transportar la energía generada para inyectarla en la catenaria, se encuentra muy lejos del trazado de la línea donde se encuentra la instalación solar fotovoltaica esto puede conllevar a la aparición de fuertes pérdidas, por lo que se podría constituir una pequeña subestación ex-profeso cercana a la instalación para conectar los elementos de corte, protección y telemando necesarios y así poder suministrar la energía a catenaria directamente desde esta.
- La idea de instalar paneles solares en la traza de la línea cuya superficie se encuentra en desuso no sería igual de rentable si la línea estuviera electrificada en corriente continua ya que en el momento que hubiera poco tráfico se podría aprovechar una parte muy pequeña de la energía generada.
- Para la instalación de los paneles a lo largo de la línea, no interesan como superficie taludes con una inclinación casi vertical (normalmente producto de superficies de roca natural). Una vez estudiadas las múltiples posibilidades de implantación, se ha considerado que los taludes en desmante muy altos que tienen un tendido superior a 3:2 o 1:2 son un problema, ya que se tratan de terrenos muy complicados porque se encuentran calculados con la estabilidad del terreno a peso propio. De este modo, si se colocara la instalación encima de ellos habría que recalcular la estabilidad de los mismos pues de no ser así se le estaría incorporando un peso añadido que la superficie no lo tendría en consideración lo cual podría ocasionar el vuelco del talud.

Por tanto, es muy importante asegurarse que todo peso que se le coloque a un talud tienda a estabilizarlo siempre. En los espaldones de un talud de relleno este peso siempre va a tender a estabilizarlo, sin embargo, en un desmante según se coloque el peso o no se recalcule la estabilidad puede llegar a desestabilizarlo.

Por tanto en a lo largo de la línea ferroviaria (Madrid-Barcelona) lo que se va a aprovechar van a ser las superficies planas, espaldones de taludes de relleno y los desmontes con una inclinación igual o inferior (si las hubiere) a 3:2 o 1:2.

- Una de las grandes complejidades de esta tecnología que se pretende implantar, es el control tan exhaustivo que se debe realizar de la energía generada, a través de los paneles solares, empleando los sistemas de telemando en la salida de los transformadores de la subestación. Esta actividad y todas las que engloban los elementos de protección, medida y control son las que van a supervisar el sistema y van a reaccionar en caso de que fuera necesario ante la existencia de fallos/faltas, déficit de energía generada y sobre todo actuar ante la presencia de sobrecargas.
- El análisis de la tecnología solar fotovoltaica para esta aplicación, conduce a pensar si quizá otras fuentes renovables de generación de energía son más rentables, por ejemplo, se podría pensar que la energía eólica constituye una solución mucho más eficiente, ya que existe la posibilidad no limitarse a producir energía únicamente en el horario solar como es el caso de la energía solar fotovoltaica y generar energía durante la noche y el día. En relación a esto último, como idea innovadora se podría estudiar un prototipo de aerogenerador instalado cerca de los postes o en el trazado de la línea, los cuales podrían producir energía con el viento lateral producido al paso de los trenes.
- Una última observación a tener en cuenta y que podría convertirse en un gran inconveniente para la implantación de esta idea es el vacío de tensión que puede producirse debido al tiempo de reacción por parte de la subestación cuando se solicite de ella la energía necesaria para cubrir la demanda de la línea que las placas no han sido capaz de suministrar, es decir, uno de los inconvenientes de la generación de energía mediante los paneles solares es la fluctuación de potencia generada. Por tanto, una cuestión importante a tratar en la puesta en marcha de esta instalación es la gestión de una demanda elevada de energía de forma prácticamente instantánea; esto puede ocasionar que al solicitar la energía de la subestación fugazmente, el grupo generador tarde unos segundos en ponerse a las revoluciones requeridas para satisfacer la demanda, es decir, puede ocasionarse un gran desequilibrio en la entrada a la catenaria. Este inconveniente podría solucionarse mediante la instalación de baterías de gran capacidad, que funcionaran como un acumulador intermedio que regulase el flujo de paso de corriente desde la instalación fotovoltaica a la red de consumo, estabilizando las eventuales bajadas de tensión y permitiendo una mejor gestión de las mismas.

- La LAV de Madrid –Barcelona supone aproximadamente un 8% del consumo total de ADIF (en torno a 2.7TWh), por tanto, cualquier tipo de ahorro repercutirá muy positivamente en el balance neto del consumo por parte del Administrador de la infraestructura

- La instalación de los módulos de generación fotovoltaica deberá realizarse de la manera menos agresiva posible tanto para el normal funcionamiento del talud como para la línea ferroviaria en sí. Ello implica que se deberán considerar factores como:
 - Tipo de cimentación para no afectar a la estructura de suelo del talud
 - Camino de escorrentía superficial y sistemas de evacuación de agua
 - Infraestructura necesaria para el mantenimiento de la instalación fotovoltaica
 - Interferencia con las necesidades de evacuación de la LAV en servicio en caso de incidencia.

- En referencia a la influencia de la normativa, es importante tener en cuenta que la legislación actual no permite, de forma libre, la inyección de energía eléctrica a la red general. Como se ha demostrado en el Trabajo, esto es un inconveniente tanto para el consumidor privado como para un ente público como el ADIF, viéndose obligado a autoconsumir toda la energía generada por su sistema solar. En este punto cabe preguntarnos ¿cómo sería la cuenta de resultados anual de ADIF si, en vez de tener que autoconsumir esta energía, recibiera dinero por vender la energía producida directamente a la Red Eléctrica? Esto sin duda es una pregunta que queda para responder en futuros estudios.

- Finalmente, cabe señalar la importancia de la planificación conjunta de grandes grupos de infraestructuras, como es en este caso el transporte con respecto de la energía. España, pese a ser el segundo país más montañoso de la Unión Europea por detrás de Suiza, ha conseguido impulsar de forma gigantesca mediante obras de ingeniería de proporciones colosales el transporte ferroviario de larga distancia mediante una nueva red de alta velocidad que es, en parte, referencia a nivel

mundial. No obstante, esta gran red ferroviaria tiene unos consumos a nivel energético y unos requisitos de mantenimiento de infraestructura que obligan a una planificación conjunta a varios niveles que parece ser no se está produciendo. Por último, cabe preguntarse por qué el país europeo con mayor índice de radiación solar no explota más este abundante y relativamente asequible recurso.

En Madrid a 5 Julio de 2018

El autor del Trabajo Fin de Master
Fdo.: Isabel María de la Paz de la Torre



El director del Trabajo Fin de Máster
Fdo.: Francisco Paños Mangrané



El cotutor del Trabajo Fin de Máster
Fdo: Joan Saura Serrat



REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

AUTORES

MARTÍ BLÁZQUEZ, M. (2016). Análisis de la solución de vía ferroviaria en balasto frente a vía en placa y montaje de superestructura en la línea de alta velocidad Madrid-Zaragoza-Barcelona-Frontera francesa. La explotación y el mantenimiento de la vía en placa y la vía sobre balasto. *Trabajo fin de grado*. Valencia: Universidad Politécnica.

VARGAS, R. (1999). La maquinaria pesada en los movimientos de tierra (descripción y rendimientos). México: Instituto tecnológico de la construcción.

MAESTRE, A. (s.f.). *¿Cómo se mide la radiación solar?*. Revista Tiempo y clima. Asociación Estatal de Meteorología. Recuperado de: <https://pub.ameweb.org/index.php/TyC/article/viewFile/697/709>

PRIETO, G. (2017). *El reparto de las horas de sol en el mundo*. Geografía Infinita. Recuperado de: <https://www.geografiainfinita.com/2017/07/reparto-las-horas-sol-mundo/>

SANCHO SILVA, J. M., RIESCO MARTÍN, J., JIMÉNEZ ALONSO, C., SÁNCHEZ DE COS, M^a C., MONTERO CADALSO, J. & LÓPEZ BARTOLOMÉ, M. (2012). *Atlas de radiación solar en España utilizando datos del SAF de clima de EUMETSAT*. Agencia Estatal de Meteorología. Recuperado de: http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas_radiacion_solar/atlas_de_radiacion_24042012.pdf

VARGAS REBOLLO, R. (2014). Uso de energías renovables en las líneas de tren de alta velocidad: Estudio de viabilidad de la línea Madrid-Valencia.. *Trabajo fin de grado*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.

INSA FRANCO, R., SALVADOR ZURIAGA, P., MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, P., VILLALBA SANCHIS, I., GARCÍA ROMÁN, C., & PALLAROL SIMÓN, S. (2016). Una introducción al ferrocarril. Elementos constituyentes de la infraestructura. Vol II. *Editorial*. Valencia: Universidad Politécnica.

SÁNCHEZ, C. (2015). *ADIF alta velocidad adjudica el suministro eléctrico de su red en 2016 por 249,1 millones de euros*. Energynews todo energía. Recuperado de: <https://www.energynews.es/adif-alta-velocidad-adjudica-el-suministro-electrico-de-su-red-en-2016-por-un-2419-millones-de-euros/>

GARCÍA ÁLVAREZ, A. & MARTÍN CAÑIZARES, M^a P. (2013). Consumo de energía y emisiones en el ferrocarril. *RENFE*, p. 72-74.

MARTÍNEZ ACEVEDO, J. C. (2002). La electrificación ferroviaria. *Gestor de Infraestructuras Ferroviarias*, p. 9-18.

RIOL JURADO, R. (Junio 2012). Revisión crítica de datos sobre consumo de energía y emisiones de los medios públicos de transporte. FFE (Fundación de los Ferrocarriles Españoles) p.12-42

GARCÍA ÁLVAREZ, A. (Abril 2016). Energía y emisiones en el transporte por ferrocarril. FFE (Fundación de los Ferrocarriles Españoles)

MARTINEZ ACEVEDO, J.C., TOBAGAS GUERRA C. & IGLESIAS DÍAZ J. (2008). Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en la infraestructura ferroviaria. *Elecrail*.

FUENTES ELECTRÓNICAS

Ministerio de Fomento. (2018). Administrador de Infraestructuras Ferroviarias, ADIF. Recuperado de: http://www.adif.es/es_ES/empresas_servicios/normativa_tecnica/normativa_tecnica.shtml

UPCommons (s.f.). Las Líneas de Alta Velocidad frente a las convencionales desde el punto de vista de la Infraestructura. Universidad Politécnica de Cataluña. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/5938/04.pdf?sequence=5>

UPCommons (s.f.). Características de diseño de la red europea de alta velocidad. Universidad Politécnica de Cataluña. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3248/50367-6.pdf?sequence=6&isAllowed=y>

Alstom. (2014). Referencias y proyectos del transporte ferroviario. Recuperado de: <http://www.alstom.com/Global/Spain/Resources/Resources%20and%20Documentation/Brochures/Referencias%20Transporte%20%20Espa%C3%B1a.pdf?epslanguage=es-ES>

El periódico de la energía. (2015). ADIF, el mayor consumidor eléctrico del país, en contra del autoconsumo. Recuperado de: <https://elperiodicodelaenergia.com/adif-el-mayor-consumidor-electrico-del-pais-en-contra-del-autoconsumo/>

Energía Solar. (2018). Componentes de las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red. Recuperado de: <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/instalaciones-red>

Energía Solar. (2018). La célula fotovoltaica. Recuperado de: <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/celula-fotovoltaica>

Mundo Respuestas. (2018). ¿En qué unidad se mide la radiación solar? Recuperado de:
<http://www.mundorespuestas.com/2013/04/en-que-unidades-se-mide-la-radiacion.html>

Adrased. (2018). Datos de radiación solar de España. Recuperado de:
<http://www.adrased.com/>

Periódico “El País”. (2018). Los 10 años del AVE Madrid-Barcelona en cifras y curiosidades .Recuperado de:
https://elpais.com/economia/2018/02/19/actualidad/1519041070_591214.html

INFORMES

ADIF. Dirección de comunicación y relaciones dirección. (s.f.) Alta velocidad. Recuperado de: <http://www.barcelonasagrera.com/wp-content/uploads/2015/04/1581.pdf>

Unión Fotovoltaica Balance Neto. (2014). La energía fotovoltaica conquista el mercado. Informe anual. Recuperado de: http://unef.es/wp-content/uploads/downloads/2014/11/MEMO-UNEF_2014.pdf

INFORMACION OBTENIDA EN CLASES MAGISTRALES.

MARTÍNEZ ACEVEDO, J. C (2018). Apuntes tomados durante la sesión de prácticas de la asignatura de Electrificación Ferroviaria, del Máster en Sistemas Ferroviarias de la Universidad Pontificia de Comillas.

GARCÍA ÁLVAREZ, A. (2018). Apuntes tomados de la asignatura de Gestión de la energía y recursos del operador, del Máster en Sistemas Ferroviarias de la Universidad Pontificia de Comillas.

GILABERTE, M. (2017). Apuntes tomados de la asignatura de Obra Civil, del Máster en Sistemas Ferroviarias de la Universidad Pontificia de Comillas.

LEGISLACIÓN

Boletín Oficial del Estado, Núm. 234, de 30 de septiembre de 2015. Ley 38/2015, de 29 de septiembre, del sector ferroviario.

Boletín Oficial del Estado, Núm. 261, de 31 de octubre de 2007. Ley 31/2007, de 30 de octubre, sobre procedimientos de contratación en los sectores del agua, la energía, los transportes y los servicios postales.

Boletín Oficial del Estado, Núm. 295, de 8 de diciembre de 2011. Real Decreto 1699/2011, de 18 de noviembre, por el que se regula la conexión a red de instalaciones de producción de energía eléctrica de pequeña potencia

Boletín Oficial del Estado, Núm. 243, de 10 de octubre de 2015. Real Decreto 900/2015, de 9 de octubre, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo.

Boletín Oficial del Estado, Núm.315, de 31 de diciembre de 2011. Orden IET/3589/2011, de 30 de diciembre, por la que se establecen los peajes de acceso a partir de 1 de enero de 2012 y las tarifas y primas de las instalaciones del régimen especial.

EMPRESAS COLABORADORAS

- Ingeniería y Técnica del Transporte, TRIA S.A. España
- Administrador de la Infraestructura Ferroviaria en España (ADIF)

ANEXOS

ANEXO 1

En este apartado se detallan los valores parciales obtenidos de los cálculos para hallar la energía anual que demanda la LAV Madrid-Barcelona. A lo largo de todo el documento se ha estado usando el valor del 11003.39kWh, este valor es extraído de aplicar el método del balance energético en el conjunto del recorrido de la línea. Este método ya se ha descrito en el epígrafe 1.2.1. *Ámbito de aplicación* y a continuación se muestran los parámetros intermedios que han llevado a conseguir dicho valor (todo esto para el tren AVE Siemens Serie103)

		AVE MPA- BAR 300
Características de la línea		
Longitud	km	621.00
Longitud de túneles	km	47.45
Factor de túnel (Tf)		1.50
Tensión de alimentación	kV	2x25kV CA
Diferencia del altitud (Hd-Ho)	m	0.00
Coefficiente de curvas	daN/t	0.12
Exceso específico pendientes	mm / km	1240.97
Velocidad media del viento exterior	km/h	10
Características del servicio		
Velocidad máxima (sin paradas)	km/h	300.00
Tiempo de viaje en el recorrido	min	158.00
Velocidad media (sin paradas)	km/h	235.82
% aprovechamiento s/plazas estándar	%	0.65
Densidad de plazas y servicios		1.00
Paradas comerciales (sin contar la final)	Nº	0.00
Paradas comerciales equivalentes		1.00
Paradas técnicas programadas	Nº	0.00
Paradas técnicas no programadas	Nº	0.10
Paradas equivalentes por reducción de velocidad	Nº	0.10
Tiempo medio parada comercial	min	2.00

Denominación del tren		s103
Características principales		
Velocidad máxima	km/h	350
Potencia total del tren	kW	8800
Masa en vacío	t	425
Masas rotativas equivalentes	t	40.05
Tensión de funcionamiento	kV	2x25kV CA
Plazas reales	plazas	404
Coefficiente A (resistencia mecánica)	daN	337.0762
Coefficiente B (resistencia entrada de aire)	daN/(km/h)	3.7603
Coefficiente C (resistencia aerodinámica)	daN/(km/h) ²	0.056361
Superficie útil bruta	m ²	525.09
Tracción y freno		0 0.00
Tipo de motor		0 Asíncrono AC
Potencia de cada motor eléctrico de tracción	kW	550
Deceleración del freno de servicio	m/s ²	0.54
Rendimientos		
Rendimiento cadena de tracción	kWhs/kWhe	0.87
Rendimiento de auxiliares	kWhs/kWhe	0.85
Servicios auxiliares		
Procedencia de la alimentación de auxiliares		Catenaria
Tiene aire acondicionado?	booleano	1
Coefficiente de transmisión de calor (K)	W/m ² °C	1.6
Consumo iluminación	kWh/h m ²	0.05
Consumo climatización	kWh/h m ²	0.2
Potencia auxiliares técnicos	kW	50
Otros parámetros calculados		
Masa cargado	toneladas	446.008

Consumo directo de energía final		
Energía para vencer resistencia mecánica al avance en recta	kWh	581.46
Energía para vencer la resistencia adicional al avance en curvas	kWh	88.94
Energía para vencer la resistencia de la entrada aire	kWh	1,529.67
Energía para vencer la resistencia aerodinámica en cielo abierto	kWh	5,408.97
Energía adicional para vencer la resistencia aerodinámica en túnel	kWh	206.64
Energía adicional para vencer la resistencia aerodinámica debida al viento exterior	kWh	1.80
Energía cinética	kWh	416.13
Energía cinética empleada en vencer la resistencia al avance	kWh	45.41
Energía cinética disipada en reducciones de velocidad (-empleada resistencia al avance) sin conducción económica	kWh	370.71
Energía potencial disipada en el freno en pendientes sin conducción económica	kWh	936.62
Energía potencial consumida por dif. de altitud entre extremos	kWh	0.00
Energía consumida por los aux. comerciales (iluminación)	kWh	69.14
Energía consumida por los aux. comerciales (climatización)	kWh	276.55
Energía consumida por los auxiliares técnicos	kWh	92.17
Energía (útil) consumida en llantas y auxiliares	kWh	9,562.65
Perdidas en la locomotora tracción (por rendimiento)	kWh	1,363.48
Pérdidas en la alimentación de auxiliares	kWh	77.27
Energía (final) importada en pantógrafo (o boca entrada depósito gasóleo)	kWh	11,003.39

ANEXO 2

Este anexo contiene la información que se ha usado para realizar los cálculos de la instalación fotovoltaica, concretamente para exponer el detalle de los costes de adquisición y el desglose del coste del ciclo de vida de la instalación. En el apartado 1.3.1. de la memoria se han expuesto sólo y exclusivamente el porcentaje de este desglose por lo que a continuación se van a especificar explícitamente los precios que se engloban tras dichas proporciones.

DESGLOSE DE IMPLANTACIÓN DE LA INSTALACION FV	
MÓDULOS	91.710.868,5€
COSTE DEL SISTEMA	63.731.281,5€
Inversores	57.35.815,335€
Componentes Estructurales	7.010.440,970€
Mano de Obra	6.373.128,150€
Ingeniería	1.911.938,445€
Conexión a red	3.823.876,89€
Consultoría	1.274.625,63€
<u>COSTE TOTAL INSTALACIÓN DEL SISTEMA</u>	155.442.150€
<u>COSTE SUMINISTRO Y MONTAJE LINEA MEDIA TENSIÓN</u>	2.794.500€
<u>TOTAL</u>	158.236.650€

DESGLOSE DEL COSTE DEL CICLO DE VIDA (O&M)	
Coste de desmantelamiento	0€
Mantenimiento Regular y limpieza	31.554,564€
Repuestos y reparaciones	32.642,852€
Recambio de inversores	163.214,258€
Otros	239.380,911€
Gestión	337.309,47€
<u>TOTAL (0.7% Coste instalación del sistema FV)</u>	1.088.095,050€

ANEXO 3

Ilustración representativa de la posible instalación de placas fotovoltaicas en un talud de relleno.

