

Prototipo experimental de un seguidor solar fotovoltaico de un eje inclinado integrado en marquesina de aparcamiento

EXPERIMENTAL PROTOTYPE OF AN INCLINED SIMPLE-AXIS SOLAR PHOTOVOLTAIC TRACKER INTEGRATED ON A PARKING CAR CANOPY



DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7157> | Recibido: 06/05/2014 • Aceptado: 10/11/2014

Juan José Jiménez de Cisneros-Fonfría, Ricardo Orduz-Marzal, Roberto Carlos Parrado-Calzado, Pedro Jesús Pérez-Higueras, Carlos Martos-Lara, Pedro Gómez-Vidal

UNIVERSIDAD DE JAÉN. Dpto. de Ingeniería Electrónica. Campus Las Lagunillas, s/n - 23071 Jaén. Tfno: +34 953 212347. jfonfria@ujaen.es

ABSTRACT

• A “ferrolinera” is a new system patented by ADIF to recharge electric vehicles from the recovery of braking energy of trains. In addition, have been equipped with ferrolinera of a plant of electric power generation photovoltaic solar energy, so that there is a source of backup power from renewable sources.

In the present article sets forth the experience developed in the design, calculation and construction of an experimental prototype of a simple axis photovoltaic solar tracker installed on the cover of canopy structures and with a capacity of up to four vehicles used as “Ferrolinera”. Additionally the installation consists of a point of recharging stations for electric vehicles. The location chosen for this prototype has been in the laboratory of energy of the company ADIF (Madrid), and has been designed by engineers of the companies AFFIRMA and ANDELSA together with researchers from the University of Jaén.

The article is limited to the photovoltaic generator and the integration of the generator in the canopy of the parking lot. This element of the “Ferrolinera” presents an innovative aspect of the project because of its original integrated monitoring system in a canopy and the proper mathematical model developed for the same

• **Key Words:** Solar Tracker, electric vehicle, Eurocode.

RESUMEN

Una “ferrolinera” es un nuevo sistema patentado por ADIF para la recarga de vehículos eléctricos a partir de la recuperación de la energía de frenado de los trenes. Además, se ha dotado a la “ferrolinera” de una planta de generación de energía eléctrica fotovoltaica, de forma que exista una fuente de energía de respaldo de origen renovable.

En el presente artículo se expone la experiencia desarrollada en el diseño, cálculo y construcción de un prototipo experimental de un seguidor solar fotovoltaico a un eje inclinado instalado sobre la cubierta de estructuras tipo marquesina a un agua y con capacidad para cuatro vehículos que se emplea como “ferrolinera”. La instalación consta adicionalmente de un punto de recarga para vehículos eléctricos. La ubicación elegida de dicho prototipo ha sido en el laboratorio de energía de la empresa ADIF (Madrid), y ha sido diseñada por ingenieros de las empresas AFFIRMA y ANDELSA conjuntamente con investigadores de la Universidad de Jaén.

El artículo se limita al generador fotovoltaico y a la integración de dicho generador en la marquesina del aparcamiento. Este elemento de la “ferrolinera” presenta un aspecto innovador del proyecto debido a su original sistema de seguimiento integrado en una marquesina y al modelo matemático desarrollado exprofeso para el mismo.

Palabras Clave: Seguidor solar, vehículo eléctrico, Eurocódigo.

1. INTRODUCCIÓN

El prototipo que se describe a continuación ha sido desarrollado por la Empresa Affirma Energy, como parte del proyecto Ferrolinera 3.0 “Desarrollo de un sistema avanzado de recarga de vehículos eléctricos desde la red eléctrica ferroviaria”, coordinado por ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias) y financiado por el programa Innpacto 2011 del Ministerio de Ciencia e Innovación. Este prototipo está inscrito como Modelo de Utilidad Nacional Nº 201430478 en la oficina de patentes y marcas.

La *ferrolinera* o centro de recarga de vehículos eléctricos en infraestructuras ferroviarias españolas (1) (2) (3), es un nuevo sistema patentado por ADIF para la recarga de vehículos eléctricos. La energía eléctrica que se suministra al vehículo es la energía generada por el tren cuando frena (frenado eléctrico regenerativo). De la energía que se genera en el proceso de frenado eléctrico, una parte es aprovechada por otros trenes y otra se disipa en forma de calor en las resistencias que lleva

el tren en el techo. Lo que hace el sistema ferrolinera es captar la energía de frenado sobrante para cargar eléctricamente las baterías de los coches eléctricos. La recuperación de la energía de frenado en toda la red de ADIF permitiría poder ahorrar en torno al 8% de la energía eléctrica de tracción consumida. A modo de ejemplo, en 2007 esto hubiera supuesto un ahorro de unos 170 GWh. La ferrolinera ha sido proyectada para ser integrada en estaciones de tren, aparcamientos y centros de servicio a lo largo de las líneas férreas españolas. El sistema está formado por los siguientes elementos principales: Convertidor Electrónico de Potencia para conexión a catenaria, Sistema de Almacenamiento y Punto de recarga de vehículos eléctricos. Además, se ha dotado a la ferrolinera de una planta de generación de energía eléctrica fotovoltaica, de forma que exista una fuente de energía renovable como respaldo a la energía recuperada del frenado eléctrico de los trenes (Figura 1). La utilización de un generador fotovoltaico permite aprovechar las horas de sol para generar y suministrar energía eléctrica, aliviando la curva de carga-generación cuando el sistema de frenado regenerativo de la ferrolinera no puede suministrar la energía suficiente en determinados tramos y/o tiempos de frenado de los trenes.

El objetivo de este artículo no es describir el funcionamiento de una ferrolinera, sólo se limitará a la descripción del generador fotovoltaico desarrollado por investigadores de la *Universidad de Jaén, Affirma Energy y Andel*, el cual presenta aspectos innovadores tecnológica y científicamente.

El aporte más importante a la innovación es el desarrollo de un sistema de seguimiento solar a un eje inclinado acoplado a una marquesina de aparcamiento, que permitirá aprovechar la máxima irradiación solar durante la mañana y tarde. De este modo el sistema de suministro fotovoltaico podrá aumentar

la disponibilidad de potencia de la estación de carga, incrementando así la capacidad de suministro a la ferrolinera. Así, los generadores fotovoltaicos con seguimiento solar permiten entregar más potencia a las primeras y últimas horas del día que con sistemas fijos, y es de gran ventaja en la aplicación de recarga de vehículos, pues aumenta la disponibilidad del suministro durante el día, reduce el uso de los sistemas de acumulación y por ende, aumenta la eficiencia del sistema. Adicionalmente, facilita la gestión de la micro-red y la logística del suministro.

Por otro lado, se ha realizado un estudio del estado del arte y no se ha encontrado en la literatura ningún modelo que describa, de forma completa y en detalle, las ecuaciones que rigen el movimiento de este tipo de seguidores solares a un eje inclinado. Este tipo de modelos si se encuentran desarrollados dentro de algunas aplicaciones informáticas específicas de simulación de sistemas fotovoltaicos (p.e. PVSYST) pero este tipo de aplicaciones, debido a su política comercial, no ofrecen casi ninguna información de los modelos matemáticos que emplean en sus simulaciones. Así, para evaluar el sistema propuesto y estimar la energía que generará se ha desarrollado "ex profeso" para este proyecto un modelo matemático de tipo de seguimiento solar empleado.

2. GENERADOR FOTOVOLTAICO

2.1. DESCRIPCIÓN

El generador fotovoltaico tiene unas dimensiones aproximadas de 10 m de largo por 5 m de ancho. Tiene una potencia de 6 kWp en condiciones estándar de medida (Irradiación de

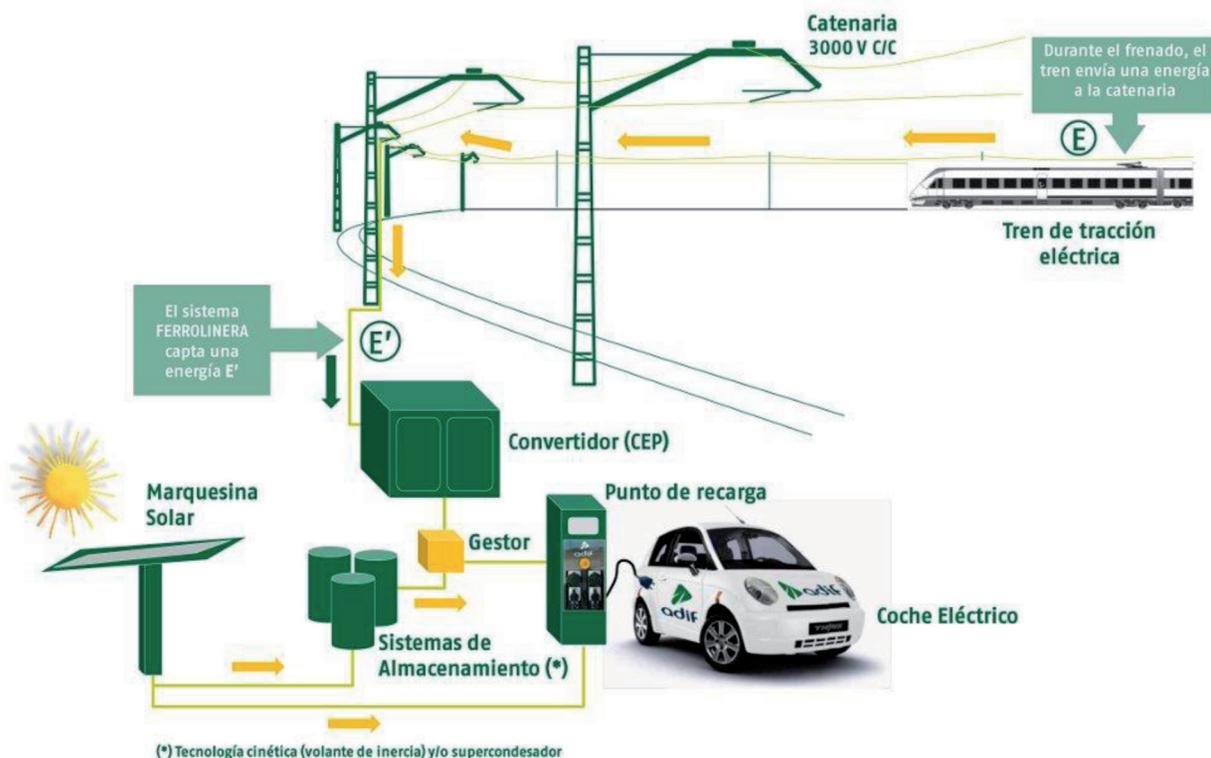


Figura 1: Esquema de captación de la energía eléctrica generada por el frenado y de distribución localizada en puntos de recarga a vehículos automóviles en una Ferrolinera.

Fuente: ADIF

1000 W/m² y temperatura de célula de 25°C) y está formado básicamente por 24 módulos de 250 Wp de la empresa *Isofoton* modelo ISF250. El generador fotovoltaico realiza un seguimiento diario Este a Oeste, está formado por ocho seguidores de tres módulos cada uno, con giro en la dirección Norte-Sur e inclinado 10° sobre la horizontal y está dotado de una estrategia del tipo de retro-seguimiento (*backtracking*) para minimizar las pérdidas por sombreado ente las distintas filas de módulos fotovoltaicos. El generador se conecta a un convertidor CC/CC para adaptar la energía eléctrica generada por los módulos FV con las características de red ferroviaria donde se va a interconectar.

El generador fotovoltaico es un elemento robusto y también crítico, ya que es un sistema que debe entregar siempre la máxima potencia disponible con el fin de alcanzar la máxima eficiencia de suministro. Para esto es necesario controlar adecuadamente la logística de los coches a suministrar, el nivel de carga del sistema de almacenamiento y la potencia del generador.

En la Figura 2 se muestra el diagrama de bloques general de una ferrolinera y como se integra el generador fotovoltaico dentro de la misma. Así, el sistema consiste en un conjunto de generadores fotovoltaicos que se conectan a un sistema de acondicionamiento de potencia que es capaz de recibir potencia tanto del sistema de generación fotovoltaica como del sistema eléctrico de la catenaria de la red de distribución eléctrica ferroviaria. Dicho conjunto puede proporcionar controladamente potencia a los puntos de recarga, creando así lo que son conocidas internacionalmente como “micro-grids”, en las que pueden convivir diversos sistemas de generación y consumo controlado. En este caso, lo que se pretende es dar prioridad al sistema de frenado de los trenes, gestionar el suministro desde la catenaria aprovechando el frenado de los trenes y aprovechar el respaldo de potencia fotovoltaico para estabilizar la red. En este punto será necesario desarrollar un detallado cuadro de gestión energética, que definirá los modos de operación de acuerdo a un plan de previsión de energía de

suministro, y que actuará sobre los distintos elementos mediante un adecuado control y gestión de potencia del sistema.

La solución de respaldo fotovoltaico tiene la ventaja de ser modular y ampliable, pues permite tener un bus común de DC para el sistema de generación, el sistema de almacenamiento, los puntos de suministro y otras cargas y para los sistemas de generación auxiliar o de respaldo. Un sistema complementario de generación en corriente continua tiene la ventaja de tener un mayor rendimiento de conversión al no disponer de elementos de conversión DC/AC adicionales, menor coste por número de equipos en el sistema y complejidad en el control de generación y demanda de energía. El rendimiento y la estabilidad de la red aumentan si el sistema se utiliza para carga directa en período diurno, permitiendo que la generación fluya directamente al suministro sin tener que recurrir al almacenamiento en la catenaria o en las baterías; así puede reducirse el sistema de almacenamiento minimizando el coste por acumulación de energía.



Figura 3: Imagen recreada en 3D del prototipo en el laboratorio de energía de ADIF (Madrid)

2.2. MODELO MATEMÁTICO

El generador fotovoltaico propuesto, desde un punto de vista solar, realiza un seguimiento diario con un eje de giro

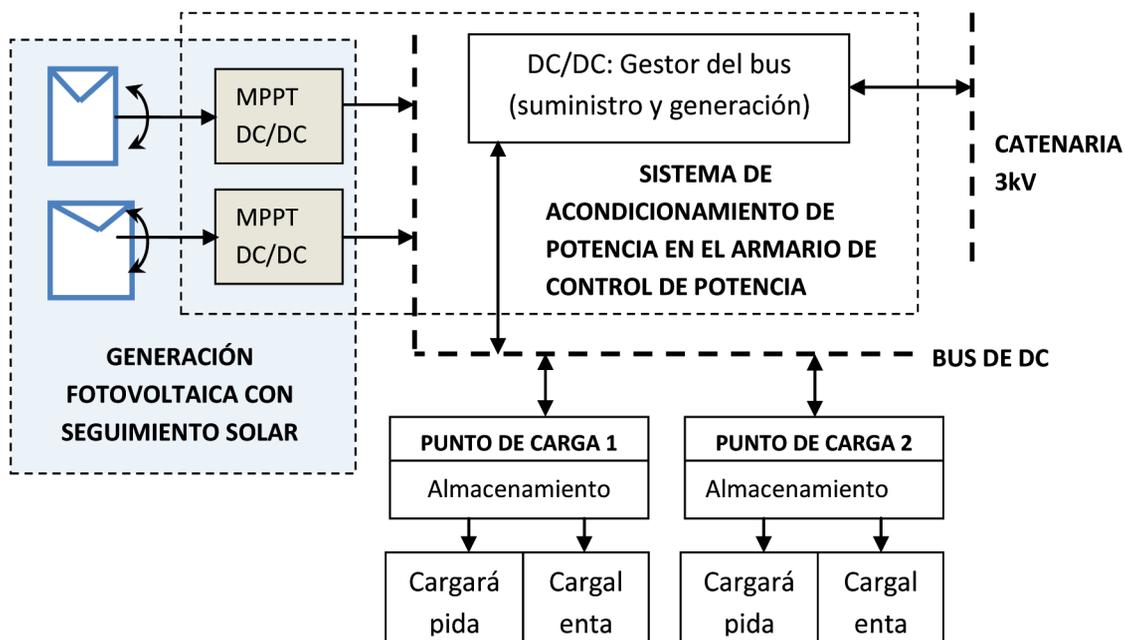


Figura 2: Diagrama de bloques general del generador fotovoltaico dentro de una ferrolinera

con dirección Norte-Sur e inclinado 10° sobre la horizontal. Este seguidor está compuesto por varias filas de módulos, cada una de ellas situada en un eje distinto y paralelos entre sí, y está dotado de retro-seguimiento (“backtracking”) para minimizar las pérdidas por sombreado ente las distintas filas de módulos fotovoltaicos.

Para la realización del modelo se va a emplear un método de cálculo basado en las siguientes consideraciones (4):

- i. Cálculos geométricos relacionados con la posición del sol relativa al seguidor. Se supone el modelo geométrico representado en la figura 4 donde los ejes XYZ corresponden al espacio SUR - OESTE - CENIT y los ejes X'Y'Z' correspondientes a la rotación de los anteriores para situar el eje X' en el eje del seguidor. Donde:
 - ii. ψ_s es el ángulo correspondiente al acimut solar
 - iii. γ_s es el ángulo correspondiente a la elevación solar. Siendo γ_{SX} y γ_{SY} las proyecciones en los planos XOX' y YOZ' respectivamente
 - iv. β_A es el ángulo de inclinación del eje de giro del generador fotovoltaico respecto de la horizontal, siendo 10° en el diseño realizado
 - v. Cálculo de la irradiación horizontal diaria media mensual directa y difusa usando las expresiones propuestas por Liu y Jordan (5)
 - vi. Cálculo de las irradiancias según el método propuesto por Whillier (6)
 - vii. Cálculo de las irradiancias en el generador usando el modelo propuesto por Pérez (7) para la componente difusa y considerando las pérdidas por transmitancia debidas a las

pérdidas de Fresnel, a la suciedad, a los bajos niveles de irradiancia y a las variaciones espectrales de la radiación solar.

- viii. Cálculo de la temperatura ambiente suponiendo que evoluciona de acuerdo con dos semiciclos de dos funciones coseno (8)
- ix. Cálculo de la potencia del generador usando el modelo de Osterwald (9)

El método de cálculo de la potencia de un generador FV propuesto por Osterwald permite calcular la potencia de salida del generador para dos valores cualesquiera de irradiancia y temperatura de célula. Este es uno de los más usados debido a su simplicidad y a los buenos resultados que ofrece en relación con los otros métodos que se usan tradicionalmente en este tipo de cálculos (10). El método de Osterwald propone que la potencia de salida del generador es proporcional a la potencia en condiciones estándar de medida y a la irradiancia que recibe y es disminuida debido a la temperatura de la célula. También se han considerado las pérdidas que se producen en el generador (reflexión, desadaptación, etc)

$$P_m = P_{m,STC} \cdot \frac{G}{G_{STC}} [1 - \gamma \cdot (T_C - 25)] [1 - L] \quad (1)$$

- dónde:
- P_m = Potencia de salida del generador (W);
 - $P_{m,STC}$ = Potencia de salida del generador en condiciones estándar (W);
 - G = Irradiancia que recibe el generador (W/m^2);

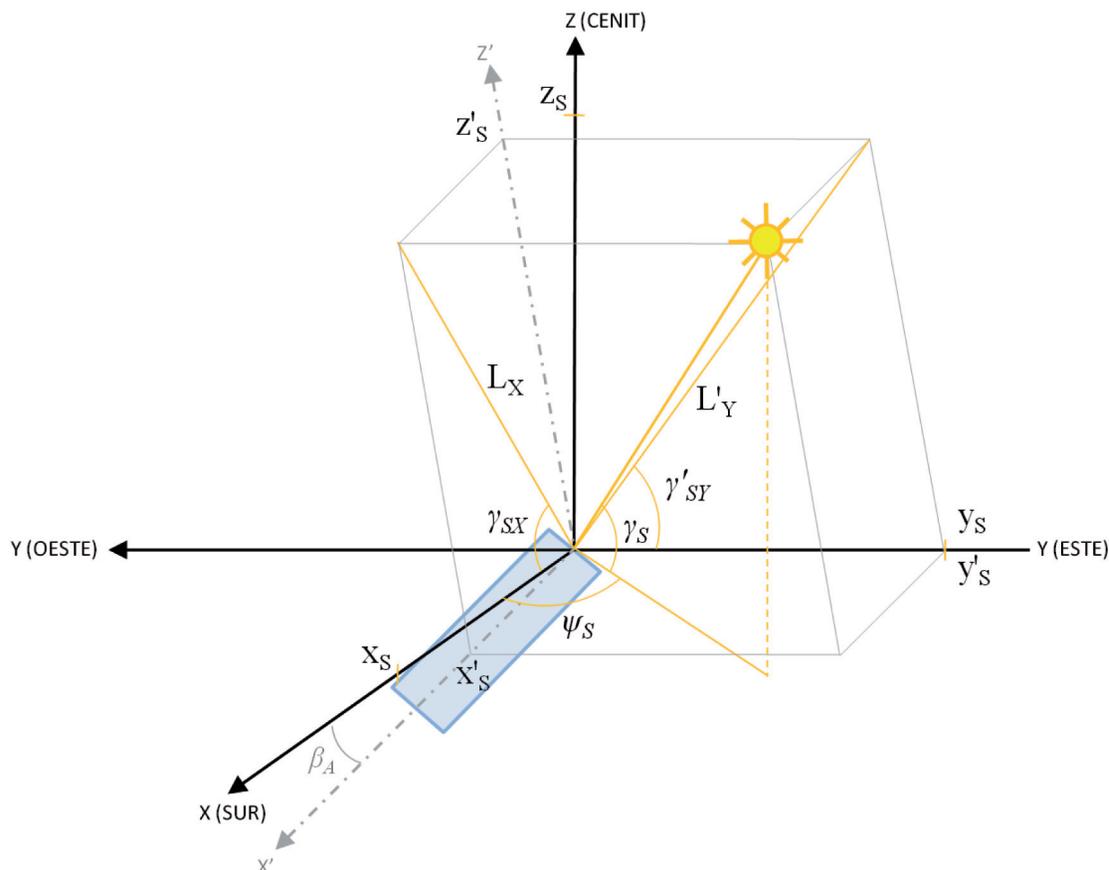


Figura 4: Modelo geométrico considerado para el seguidor solar

G_{STC} = Irradiancia en condiciones estándar (1000 W/m^2);
 γ = Coeficiente de variación de la potencia con la temperatura ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).
 T_C = temperatura de la célula;
 L = Otras pérdidas del generador

En la Figura 5 se representa la evolución diaria media mensual de la potencia eléctrica de salida del generador fotovoltaico, en la misma se observa como la curva es plana y constante durante la parte central del día, a diferencia de lo que ocurre en los generadores sin seguimiento, y por lo tanto, este tipo de seguidores presenta ventajas (tamaño de la batería, gestión de la energía, etc.).

Potencia electrica salida

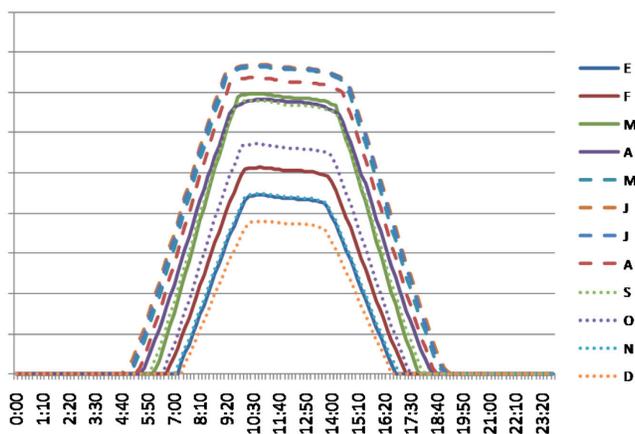


Figura 5: Evolución diaria media mensual de la potencia de salida del sistema fotovoltaico

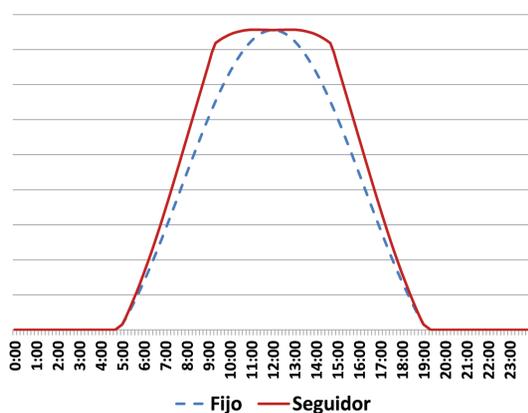


Figura 6: Evolución típica diaria de la potencia eléctrica del sistema con seguidor solar desarrollado frente a un sistema donde el generador está fijo

Para validar el modelo propuesto se ha comparado el valor de la energía eléctrica anual estimada por el mismo y la estimada por el programa PVSYST para diferentes distancias entre ejes de giro y para tres ciudades diferentes (ver Tabla 1). Se ha comprobado como la diferencia es algunas veces positiva y otras negativa, pero siempre es menor del 3%, siendo un error pequeño en este tipo de estimaciones. Así se puede

considerar que los valores aportados por el modelo propuesto son correctos.

Distancia entre ejes (m)	Barcelona	Madrid	Sevilla
1,25	1,2%	-1,3%	0,4%
2	2,3%	-0,7%	-0,1%
3	2,7%	-0,4%	-0,3%
4	2,9%	-0,3%	-0,2%

Tabla 1: Diferencia entre los valores de Energía Eléctrica Anual producida por el generador fotovoltaico estimados por del PVSYST y el Modelo matemático desarrollado

3. DISEÑO MECÁNICO Y ESTRUCTURAL

3.1. REQUERIMIENTOS ESTRUCTURALES Y DE FABRICACIÓN

El sistema mecánico de apoyo de los paneles y que desarrolla el movimiento de seguimiento solar, así como la estructura soporte y de cimentación, han sido diseñados para resistir las cargas ejercidas por el sistema de transmisión y las de viento, nieve y sismo estimadas según normativa actual vigente (Código Técnico de la Edificación (11) y Norma de Construcción Sismorresistente (12)) para el emplazamiento seleccionado. Adicionalmente se han empleado los parámetros definidos en los Eurocódigos estructurales (13), a fin de desarrollar un producto homologado en cualquier país de la región Europea. La implantación en emplazamientos diferentes requerirá únicamente de la adaptación a las condiciones de sitio y sus características particulares.

El prototipo ha sido construido con objeto de servir como primera experiencia para depurar los posibles errores de diseño. Sin embargo todo el proceso ha sido elaborado considerando la futura implantación. Los aspectos principales considerados son los siguientes:

- **Funcionalidad:** cumplimiento de las exigencias preestablecidas, donde cabe destacar la de sistema de cubrición y resguardo del puesto de recarga y de los vehículos estacionados y de estructura necesaria para el apoyo de la instalación de generación fotovoltaica.
- **Resistencia, estabilidad y rigidez:** el sistema debe ser capaz de resistir los esfuerzos originados por las diferentes acciones actuantes, así como la combinación de ellas. Adicionalmente debe ser lo suficientemente rígida para permitir el correcto funcionamiento del mecanismo de seguimiento.
- **Facilidad en la fabricación,** a través de la estandarización e industrialización de la solución implementada, tanto de la perfiles y uniones empleadas y diseñadas, como de las soluciones constructivas adoptadas.
- **Facilidad en el montaje:** conseguida a través de soluciones atornilladas que no requieren soldadura en obra (y por tanto operarios cualificados).
- **Durabilidad,** mediante tratamiento anticorrosivo de gal-

vanizado en todos los componentes estructurales. Los elementos mecánicos deberán ser debidamente engrasados en la vida útil así como protegidos del medio ambiente.

- Sostenibilidad: el uso de acero, material con un rendimiento de reciclado cercano al 100%, disminuye el impacto ambiental y por tanto se reduce considerablemente la huella de carbono imputable del producto.
- Modulación: se ha optado por una solución fácilmente modulable, adaptándose al espacio disponible únicamente por repetición de elementos en las direcciones requeridas.

Todos estos puntos han sido desarrollados considerando minimizar los costes finales y contemplando todos los procesos: adquisición de material (minimización del material sobrante), fabricación (estandarización de piezas de corte y de conjuntos ensamblados), transporte (adaptación a dimensiones máximas) y montaje (conjuntos atornillados en obra sin requerimiento de soldaduras).

Tanto los elementos de soporte del sistema de seguimiento como los elementos estructurales de la marquesina han sido diseñados con perfiles tipo tubo estructural. El motivo de esta selección está justificado ya que las transmisiones mecánicas se facilitan considerablemente al no requerir elementos adicionales.

3.2. DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA DE SEGUIMIENTO

El sistema de seguimiento diseñado se asemeja al de un mecanismo tipo biela-manivela con ángulo de rotación restringido y alternativo (ver Figura 7). El movimiento de giro es ejercido por un actuador de 40 kN de capacidad máxima, descentrado respecto al eje de transmisión. Éste se encuentra atornillado directamente a la estructura, ejerciendo la carga horizontal al pilar. Los paneles se encuentran fijados al eje que giran, recibiendo el movimiento circular mediante la excentricidad del eje con desplazamiento lineal. Los ejes están apoyados sobre la estructura soporte en rodamientos autoalineantes, que permiten un centrado óptimo y absorber posibles excentricidades de fabricación; esta estructura a su vez descansa sobre los dinteles de cubierta unidos a los pilares. El mecanismo permite la orientación de los paneles desde $+45^\circ$ a -45° , habiéndose optimizado en dimensiones para requerir el mínimo espacio posible y no incrementar excesivamente el sobrevuelo de la cubierta.

3.3. SISTEMA ESTRUCTURAL DE CUBRICIÓN Y SOPORTE

La estructura de marquesina cumple la doble función de soporte del sistema de paneles y de cubrición frente a inclemencias del tiempo, tanto de los puntos de recarga como de los vehículos estacionados. La solución estructural adoptada se corresponde con una marquesina con una única columna



Figura 7: Estructura metálica y mecanismo de seguimiento instalado en cubierta

ubicada en el lateral empotrada en la cimentación. El dintel en voladizo se encuentra conectado al pilar a través de una articulación en el extremo, y reforzado a través de una escuadra. La ventaja de este sistema respecto a otros considerados es que según la latitud se permite incrementar la ganancia variando el ángulo de inclinación de los paneles, operación fácilmente ejecutable simplemente modificando la longitud del refuerzo indicado.

Para el emplazamiento del prototipo se han considerado las acciones establecidas por norma, según indicado. Para el caso de la acción del viento se han considerado las diferentes posiciones que pueden presentar los paneles en el seguimiento, previendo la posibilidad del automatismo de autodefensa que disponen los paneles, consistente en posicionarse horizontalmente cuando el viento supera la velocidad de 100 km/h.

Todas las conexiones de la estructura han sido consideradas y diseñadas como articuladas (a excepción del apoyo en cimentación, que ha sido considerado como rígido) al tratarse de rótulas tipo orejetas con bulón pasante, por lo que para evitar el hipostatismo en la conexión dintel-pilar ha sido necesario disponer una triangulación adicional a modo de un cartabón. Se ha optado por disponer soluciones articuladas con objeto de facilitar la instalación del sistema y la estandarización de las soluciones constructivas.

La cimentación se ha diseñado mediante una única zapata corrida sobre la que transmiten las cargas los pilares. Ha sido calculada para evitar el vuelco y el deslizamiento, y que las presiones transmitidas al terreno sean inferiores a las resistencias definidas según el estudio geotécnico desarrollado para la zona.

4. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha expuesto el trabajo desarrollado en la conceptualización, diseño y fabricación de una marquesina a un agua que sirve como sistema de soporte de paneles solares y de cubrición del punto de recarga y los vehículos

estacionados. Se ha desarrollado el proyecto completo, que incluye las disciplinas eléctrica, automática, mecánica y civil.

Se pueden sacar las siguientes conclusiones tras el trabajo elaborado:

1) Se ha diseñado una instalación fotovoltaica de respaldo a una instalación principal de generación de energía eléctrica por el paso de trenes, denominada "ferrolinera". Esta infraestructura además cumple la función de cubrición de los puntos de recarga y de los vehículos eléctricos estacionados durante el proceso de recarga de las baterías. Este respaldo es modular y ampliable según las necesidades de cada caso.

2) Se ha desarrollado e implementado un modelo analítico de seguimiento diario de los paneles respecto a la posición del sol, considerando varias filas de módulos ubicadas en ejes distintos y paralelos entre sí. Este modelo considera el sombreado de las filas de paneles solares con las contiguas y el cálculo de los diferentes parámetros está basado en modelos previamente desarrollados por diferentes autores.

3) La estructura metálica soporte ha sido desarrollada teniendo en cuenta criterios de sostenibilidad, adaptabilidad a cualquier emplazamiento, modularidad, resistencia, rigidez y económicos. Los cálculos han sido elaborados considerando el emplazamiento en el que se ha implementado el prototipo, pero son extensibles a diferentes parámetros de sitio.

El prototipo instalado será posteriormente instrumentado con objeto de realizar la medición de la ganancia, y estimar la correspondencia con los cálculos realizados.

AGRADECIMIENTOS

El diseño del prototipo fue realizado para la Empresa *Affirma Energy*, miembro del consorcio del proyecto Ferrolinera 3.0 "Desarrollo de un sistema avanzado de recarga de vehículos eléctricos desde la red eléctrica ferroviaria", coordinado por ADIF (administrador de infraestructuras ferroviarias) y financiado por el programa Innacto 2011 del Ministerio de Ciencia e Innovación acorde a la Orden CIN/699/2011.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Martínez-Iglesias E. "Aprovechamiento de la energía de frenado regenerativo de los trenes de cercanías en las estaciones La Serna y Parque Polvoranca". Universidad Carlos III de Madrid, Proyecto de fin de carrera, 2012.
- [2] Moreno-Herrero J. "Impacto del vehículo eléctrico sobre las redes de distribución". Proyecto Fin de Carrera, E.T.S.I. Minas, Universidad Politécnica de Madrid, 2013.
- [3] López-Durán D. "Estudio del aprovechamiento de la energía regenerada por los trenes". Proyecto de fin de carrera, Universidad Pontificia de Comillas, 2010.
- [4] M.A. Green, "Solar cells. Operating principles, Technology and System Applications", Prentice-Hall, Nueva Jersey, 1982.
- [5] Liu-B.Y.H. y Jordan-R. C. "The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation". *Sol.Energy* 4(3), 1-19 (1960). *Sol.Energy*, págs. 1-19. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(60\)90062-1](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(60)90062-1)
- [6] Whillier A. "The determination of hourly values of total solar radiation from daily summations". *Arch. Meteorol. Geophys. Biokl. Ser. B* 1956 7(2):197-204.
- [7] Perez R. et al. "A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces", *Solar Energy* 1987 39(3): 221-231.
- [8] Aguiar R., "Series sintéticas de parámetros meteorológicos (Synthetic series of meteorological parameters)". Ph.D. thesis. Lisbon University, Lisbon, Portugal, 1996, 525 pp.
- [9] Osterwald C.R. "Translation of device performance measurements to reference conditions". *Solar cells*, 18 (1986) pp 269-279. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0379-6787\(86\)90126-2](http://dx.doi.org/10.1016/0379-6787(86)90126-2)
- [10] Fuentes M., Nofuentes G., Aguilera J., Talavera D. y Castro M. "Application and validation of algebraic methods to predict the behaviour of crystalline silicon PV modules in Mediterranean climates". *Solar Energy*, 81 (2007) pp. 1396-1408. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2006.12.008>
- [11] Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, Ministerio de Fomento 2009
- [12] NCSE-02: Norma de Construcción Sismorresistente, Ministerio de Fomento, 2004.
- [13] Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural: Acciones en la Edificación - CTE-DBSE-AE, 2009.
- [14] Instrucción de acero estructural EAE: Ministerio de Fomento, 3ª edición, 2012.