

## CONCENTRADOR SOLAR EUCLIDES

Parque Eólico. Instituto Tecnológico y de Energías Renovables.  
Tenerife, Islas Canarias

Como principal elemento innovador, el concentrador Euclides es prácticamente el primer concentrador fotovoltaico con seguimiento en un eje, pretendiendo abaratar los costes de la estructura. Usa espejos de perfil optimizado y tecnología nueva. El refrigerador, optimizado gracias a una tecnología nueva de montaje (nueva al menos en el sector fotovoltaico) pesa la mitad que otros modelos como, por ejemplo, los americanos.

Las células Saturno de concentración son nuevas y, por primera vez en el mundo, están encapsuladas en módulos receptores de concentración. La salida es a alta tensión evitando el costoso cableado de campo.

La característica más destacable de este proyecto es que ha permitido la fabricación a gran escala, dando como resultado la creación de la infraestructura industrial necesaria para el abaratamiento de los costes de producción. El proyecto dará lugar a la posibilidad de establecimiento de una línea de producción a escala real lo que incidirá directamente en la posibilidad de replicabilidad del proyecto.

De hecho, este proyecto no sólo permite su instalación en emplazamientos con condiciones de insolación aceptables, sino que permitirá además el abaratamiento de las instalaciones que se realicen posteriormente debido precisamente a la posibilidad de establecer la mencionada línea de producción.

La repercusión en el empleo local es considerable: durante la fase de fabricación de los componentes de la instalación, se han generado 25 puestos de trabajo durante un año, correspondientes a un gasto directo que se realizará en la región de unos 230 millones de pesetas. Durante esta fase se ha llevado a cabo en la isla de Tenerife el montaje de la estructura, los inversores, parte de la fabricación de los espejos, la obra civil y el sistema de monitorización. Una vez en funcionamiento, se llevará a cabo la monitorización de la instalación durante un periodo de dos años durante los cuales se generarán dos empleos por año. Las tareas de operación y mantenimiento crearán un empleo/año.

La producción energética anual de la instalación es, basándose en las condiciones climatológicas de la zona, de 846.527 kWh/año. Esta energía, totalmente autoproducida con fuentes de energías renovables, será inyectada a la red de la Compañía eléctrica.

La producción energética prevista supone la sustitución de 228,5 toneladas de fuelóleo al año. En términos medioambientales se consigue con esta sustitución evitar la emisión a la atmósfera de 946 toneladas de CO<sub>2</sub>, 6.518 kg de SO<sub>2</sub>, 2.582 kg de NO<sub>x</sub> y 831 kg de CO al año, perjudiciales para el calentamiento global de la tierra en general y para la salud local.

En términos económicos, la inversión total ha sido de 525 millones de pesetas, incluyendo costes de diseño, dirección y monitorización de la instalación. La rentabilidad económica radica en que se ha conseguido reducir el coste de los sistemas fotovoltaicos de 977 pta/Wp para el caso de la instalación de Toledo PV (1 MW) hasta las 797 pta/Wp para esta instalación de demostración. Las previsiones son que, para una instalación de 10 MW, el precio se reduzca hasta las 495 pta/Wp como resultado de las técnicas de producción desarrolladas en este proyecto.

## INTRODUCCIÓN

El alto coste de los módulos fotovoltaicos ha sugerido hace tiempo la concentración de la radiación solar sobre un área reducida de células solares como posible vía de abaratamiento de las instalaciones de generación fotovoltaica. El objetivo de la concentración es, por tanto (como el de casi todas las investigaciones sobre conversión fotovoltaica) el abaratamiento de la energía, es decir, la reducción del coste del kWh generado hasta dejarlo en niveles aceptables para el mercado energético actual. Se pretende así romper el límite de la no-rentabilidad de los paneles fotovoltaicos planos que en su día ya rompiera la energía eólica.

En esta línea de investigación, el **ITER** (Instituto Tecnológico y de Energías Renovables), como coordinador y propietario, y **BP Solar** y el **IES-UPM**, como socios, han realizado juntos, con la financiación de la Unión Europea dentro del programa Joule-Thermie (40 %) y del **Miner** dentro del PAEE (9 %) y con la participación como patrocinador de **Unelco** y **Endesa**, la instalación de concentración fotovoltaica de 480 kW Euclides (*European Concentrated Light Intensity Development of Energy Sources*), situada en el sur de la isla de Tenerife.

## SISTEMAS DE CONCENTRACIÓN. GENERALIDADES

La concentración fotovoltaica consiste en sustituir las células solares por sistemas ópticos (llamados concentradores) que dirijan la luz sobre las células más pequeñas. Por tanto, mientras que en los sistemas fotovoltaicos convencionales la colección de la energía solar y su conversión en electricidad eran dos funciones desempeñadas por la célula solar; la concentración desacopla ambas funciones, siendo la colección realizada por el concentrador y

la conversión por la célula, razón por la cual son de desear células muy eficientes aunque sean caras.

## **DISPOSICIÓN PARABÓLICA DE LOS ESPEJOS**

Aunque la evolución es muy prometedora, la repercusión comercial de la concentración es actualmente menor que la del panel plano convencional, tanto en EE.UU. y Japón como en Europa. Una de las razones para ello es que los costes fijos de la concentración son mayores que los del panel plano. No olvidemos que necesita de un sistema de seguimiento solar lo que exige que la potencia mínima instalada en concentración sea superior.

Donde la concentración parece ofrecer más posibilidades de éxito es en el mercado de las grandes centrales de energía eléctrica; de hecho, la concentración óptica ya ha entrado en este mercado, aunque de momento el procedimiento para generar energía eléctrica no es el fotovoltaico sino mediante un ciclo térmico.

La concentración fotovoltaica está actualmente en alza en el mercado de las energías renovables por lo que tiene muchas posibilidades de alcanzar los objetivos de coste de energía eléctrica necesarios para entrar en unos márgenes aceptables que rocen la rentabilidad.

## **DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN Y DE SUS COMPONENTES**

La instalación Euclides (alrededor de la cual gravita este proyecto) se compone de 14 líneas de 82,98 metros con un único mecanismo tractor de seguimiento solar. Cada unidad tiene una potencia nominal de 34 kWp, con lo que el total instalado es de 480 kWp. Cada estructura posee su propia electrónica para llevar a cabo el seguimiento al sol. Cada línea de módulos o *array* presenta un mínimo de 796 V y un máximo de 849 V en circuito abierto. Existe un inversor por cada dos *arrays* que distribuye corriente alterna a un transformador general convencional.

## **MÓDULO RECEPTOR DE CONCENTRACIÓN**

En el módulo receptor, las células de concentración están interconectadas y encapsuladas como en los módulos planos. Anteriormente, estas células se adquirirían como componentes, constituyendo su conexión un problema para el fabricante de sistemas, quien tenía que utilizar delicadas técnicas de interconexión (generalmente desconocidas para él) para proteger las células. Los módulos actuales, completamente encapsulados, pueden manejarse fácilmente por los fabricantes de concentradores.

Las investigaciones sobre este módulo indican que, en un futuro próximo, este módulo tendrá que ser un producto más sofisticado que un módulo plano por varias razones. Primera, el encapsulante deberá soportar altas irradiancias y temperaturas (lo cual sólo ocurre accidentalmente); debe proporcionar una baja resistencia serie de interconexión de células y permitir un buen contacto térmico con el disipador; a la vez, debe presentar un correcto aislamiento respecto del exterior, incluso sometido a un alto voltaje . Además, los módulos están equipados con un diodo de *bypass* como protección contra puntos calientes.

Este elemento ha sido desarrollado por **BP Solar** en su factoría de Alcobendas (Madrid), siguiendo muchas ideas del **IES**, pero con aportación de su experiencia en células y encapsulado de panel plano para obtener un producto absolutamente nuevo a escala mundial.

## ÓPTICA DE CONCENTRACIÓN

La óptica de concentración de Euclides está basada en espejos en lugar de lentes de **Fresnel** utilizadas anteriormente en todos los proyectos (satisfactorios) de concentración fotovoltaica. Comparando espejos y lentes, se encuentran pros y contras para cada opción, pero fueron dos las razones que impulsaron a usar espejos. Una es el hecho de que los espejos, y no las lentes, permiten emplear sistemas de seguimiento de un eje, de menor coste. La otra es que las lentes deben protegerse del polvo por su parte trasera lo que exige un sistema de protección muy caro. Además, el éxito relativo de las opciones de concentración solar térmica en los EE.UU. prueba que la opción del espejo es más prometedora en cuanto a efectividad de costes.

Una vez elegida esta opción, el perfil del reflector se optimizó usando óptica no formadora de imagen para permitir la mayor tolerancia de errores de fabricación para un nivel dado de concentración (en este caso una ganancia geométrica de 38X ). Dado que este perfil no existía en el mercado y habida cuenta de la precisión requerida (que dudosamente se obtendrá con vidrio), se desarrolló una nueva tecnología de fabricación. La curva del perfil diseñado fue facilitada a JUPASA, quien construyó cuatro moldes de aluminio mecanizado para que el ITER conformara los espejos en sus instalaciones en Tenerife.

Con el fin de estudiar el rendimiento de varias tecnologías para la ejecución de futuras instalaciones de concentración, se ha decidido incluir diferentes opciones de materiales para la construcción de las láminas reflectoras. La solución adoptada consiste en lo siguiente:

- Cuatro líneas de la instalación estarán dotadas de Anofol 1000.9 sobre base de chapa de aluminio de 0,4 mm de espesor como película reflectante para los espejos de concentración, que estará situada sobre una base de aluminio 5754 H111 de 1,5 mm de espesor.
- Nueve líneas tendrán Sylverlux SS95P de 3M (plata) de 1,2 mm de ancho como lámina reflectante que, igual que en el caso anterior, se situará sobre una chapa base de aluminio 5754 H111 de 1,5 mm de espesor.
- Una línea utilizando como lámina reflectante película plateada ya laminada sobre una chapa de aluminio, fabricada por **Alcoa**.

El buen comportamiento de la óptica es esencial para el éxito de esta tecnología, puesto que en este sistema todas las células están conectadas en serie. Manteniendo la citada homogeneidad, el sistema puede ser distorsionado debido al efecto del viento u otras causas, o sufrir un pequeño desalineamiento que no afectaría a la salida de electricidad.

Por otro lado, el buen comportamiento de los espejos se explica porque la tecnología de capas finas utilizada, reproduce perfectamente el perfil teórico, algo dudoso con espejos de vidrio, y porque el diseño teórico sigue las reglas de la óptica no creadora de imagen para la minimización de la banda de luz.

## **EL DISIPADOR**

Una de las preguntas más usuales relativas a las células solares de concentración se refiere a la presunta dificultad para mantener baja su temperatura. Parece natural que la célula bajo concentración se caliente, más aún si recordamos que, con sistemas ópticos similares, los fluidos alcanzan temperaturas muy elevadas (cientos de grados centígrados). Este hecho podría ser considerado como un obstáculo casi inevitable para la concentración ya que es bien sabido que las células solares reducen su eficiencia al aumentar la temperatura.

En cualquier caso, un sistema disipador de calor diseñado correctamente puede mantener baja la temperatura de las células solares. Para el nivel de concentración y el tamaño de los receptores (las células) considerados, esto puede obtenerse mediante la transferencia pasiva de calor al ambiente, usando la convección natural del aire en un intercambiador de calor con aletas.

Por este motivo, Euclides usa un refrigerador de aletas de aluminio, que ha demostrado su eficacia para mantener la temperatura de las células a unos 25-35 °C sobre ambiente, dependiendo de las condiciones climáticas (viento y radiación). Algo similar es lo que ocurre a las células en un módulo plano (unos 15-25 °C sobre ambiente).

Pero, por supuesto, esto no se consigue sin una buena tecnología. El calor a eliminar se transporta al aire, que consecuentemente se calienta y se mueve por convección. Para que la transferencia de calor sea efectiva se requiere una superficie ampliada orientada verticalmente (es decir, una estructura multi-aletas) y conducción eficaz del calor de la célula a las aletas. Todo ello se ha logrado utilizando aluminio y optimizando el diseño de todos los elementos, destacando el espesor de las láminas y su separación. El **IES** se ha encargado del modelado físico del problema y la optimización, para conseguir minimizar la caída de temperatura para un peso dado de aluminio. De este modo, la tecnología de extrusión, usada anteriormente por nosotros y nuestros competidores, ha sido descartada y sustituida por otra tecnología de bajo coste que consigue lo mismo con la mitad del material que la extrusión. Este refrigerador alcanza un incremento de temperatura de 30 °C en ausencia de viento, para su máxima potencia (780 W/m<sup>2</sup>).

Otro aspecto a considerar es la reducción de la caída de temperatura en la interfase módulo-disipador, que es de sólo 1 °C al rectificar las caras de contacto y usando un pegamento especial que cumpla las especificaciones mecánicas y térmicas.

Otra importante subida de temperatura, de unos 6 °C, se produce entre la célula solar y la base del módulo receptor, debido a que debe mantenerse simultáneamente un buen aislamiento eléctrico. Esta subida puede en cualquier caso reducirse en los módulos que **BP Solar** fabricará en un futuro. De esta manera, la máxima subida de temperatura es de 37 °C aunque en la mayoría de los casos es substancialmente menor debido a la menor entrada de potencia y al efecto del viento.

## LA ESTRUCTURA DE SEGUIMIENTO

La estructura de seguimiento de un concentrador es uno de los elementos más importantes del sistema porque constituye, en términos de coste, la mayor compensación a pagar por disminuir el área de célula. Aunque son posibles muchas configuraciones, el desarrollar cada una de ellas no resulta trivial en términos de coste. La solución adoptada para el prototipo fue considerada adecuada hace dos años y aún hoy lo parece.

La opción adoptada está inspirada en la bien desarrollada solución solar térmica de California (*Luz Solar Technology*). Consiste en un sistema horizontal con seguimiento en un eje y se justifica en que los sistemas de un eje son más baratos en conjunto que los de dos ejes.

Esta disposición obliga al uso de espejos a causa de sus propiedades ópticas. Las lentes siempre requieren seguimiento en dos ejes. Al no requerir protección, como las lentes, se obtiene una nueva reducción de coste.

### FICHA TÉCNICA DE LA INSTALACIÓN

Tipo de concentrador:	Cilindro parabólico de espejos lineales
Orientación:	Horizontal, orientado N/S
Seguimiento:	Un eje
Estrategia de seguimiento:	Sistema experto basado en coordenadas astronómicas
Exactitud en el seguimiento:	> +/- 0,2°
Mecanismo de seguimiento:	Conjunto de arrastre con tornillo sin fin y motor reductor
Angulo de aceptación:	> +/- 0,75°
Optica del concentrador:	Tres tipos de lámina reflectora sobre chapa de aluminio
Ancho del <i>array</i> :	3,60 m
Razón de la concentración geométrica:	38,5 X
Eficiencia óptica total:	88%
Células solares:	Células de concentración tipo Saturno: Eficiencia a 17 W/cm <sup>2</sup> y AM1.5 de 19%
Tamaño del <i>array</i> estándar:	14 líneas x 82,98 m largo y 68 kWp cada una
Refrigeración:	Disipadores de calor pasivos
Salida estándar a 1.000 W/m <sup>2</sup> :	Min: 796 V. Max: 849 V. Sistema flotante
Temperatura normal de operación a 750 W/m <sup>2</sup> :	30 °C sobre ambiente
Inversor:	Autoconmutado a frecuencia variable con conexión a red
Transformador:	Estrella "Y", 630 kVA, 20 kV/220 V
Potencia nominal de la instalación:	480 kWp
Horas de sol:	2.406 h/año
Rendimiento global:	73%
Energía anual estimada:	846.527 kWh

Un argumento final a favor de esta solución horizontal de un eje es que las células pueden conectarse fácilmente en serie de modo que el generador ofrece una elevada tensión de salida. Esto es muy importante porque evita el costoso cableado y la interconexión de campo.

En el concentrador es preciso asegurar la uniformidad de la línea de luz concentrada a lo largo del receptor. Para ello los espejos deben estar muy juntos de modo que se consiga una casi continua superficie reflectante. En este aspecto, la concentración fotovoltaica difiere de la térmica, que no requiere tal continuidad.

Teniendo en cuenta los requerimientos anteriores, la solución adoptada consiste en dos vigas reticulares, parecidas a las antenas de onda media, que se apoyan en una rueda central y en dos apoyos terminales. De las 14 estructuras de 84 metros, 13 son de hierro y una de hierro galvanizado. Para asegurar la durabilidad de las estructuras a largo plazo se las ha sometido a un proceso de pintado muy completo llevado a cabo por la Compañía **Julio Crespo**, S.A.. Este proceso incluye un chorreado de arena grado 21/2 en las 13 estructuras de hierro sin galvanizar y la aplicación de cuatro capas de pintura de la siguiente forma: 12 estructuras con cuatro capas de Hempel (1ª capa rica en zinc) y una estructura con cuatro capas de Corroless (1ª capa reacciona con el óxido eliminándolo). En la estructura de

hierro galvanizado se ha aplicado un proceso Hempel igual que el anterior exceptuando la 1ª capa que en este caso es rica en fosfato de zinc para asegurar así su agarre al galvanizado. Por otro lado, los disipadores, ya equipados con su módulo receptor, se colocan sobre unos brazos fijos en las vigas. De igual modo se colocan los espejos.

Todo el conjunto gira alrededor de la rueda central que recibe movimiento mediante un cable fijo a la tuerca de un tornillo sin fin. El apuntamiento al sol se hace mediante un sistema en bucle abierto, que ese combina con una estrategia de aprendizaje y verificación. De este modo, el sistema puede ser orientado en un acimut arbitrario, conocido, además, con escasa precisión. Esto facilita y abarata enormemente la puesta a punto en el campo. La electrónica de seguimiento ha sido desarrollada por **Inspira**, S.L.

El diseño se ha llevado a cabo utilizando programas simuladores de la deformación resultante en la superficie de los espejos para diversas condiciones de carga, incluidas las del viento.

## **INVERSOR**

La disposición del campo fotovoltaico, agrupado en 14 líneas, unidas a otros factores deseables (alta frecuencia, PWM, modularidad, bajo costo relativo, etc...) así como una estrategia segura y sencilla de mantenimiento, prácticamente señalan a los Power IGBTs (*Isolated Gate Bipolar Transistors*) como los candidatos ideales para la realización del inversor estático TEIDE (*Technology Electronic Inverter Designed for Euclides*).

Se ha utilizado una arquitectura de triple semipunto (ideal para conversión trifásica) con circuitos de excitación aislados ubicados en un montaje integral de gran calidad, con cifras despreciables de inductancias y capacidades parásitas. Por razones naturales de eficiencia, tales inversores funcionan en régimen de conmutación, utilizándose esencialmente la modulación de anchura de pulsos (PWM) a frecuencia variable con el objeto de poder generar una forma de inyección de corriente en red sinusoidal, lo que permite además mantener factores de potencia (PF) cercanos a la unidad.

COSTES DE LA TECNOLOGÍA EUCLIDES EN COMPARACIÓN CON LA INSTALACIÓN TOLEDO PV			
Costes en pta/Wp	Toledo 1 MW	Euclides 500 kWp	Euclides 10 MWp
Módulo	707	137	52
Espejos	0.00	105	47
Disipadores	0.00	98	68
Módulo pre-montaje	13	2	2
Módulos y montaje de espejos	42	10	10
MÓDULO INSTALADO	762	349	179
Preparación de la zona	29	0,18	0,15
Estructuras	43	1,97	1,3
Montaje de estructura	14	0,16	0,08
MONTAJE DE ESTRUCTURA E ING. CIVIL	89	374	246
Cableado y contadores	50	0,00	0,00
Distribución c.c.	8	6	6
Inversor	35	32	31
Conexión a la red y transformación	19	18	16
CONDICIONAMIENTO DE POTENCIA	113	56	55
TRANSPORTE	16	16	16
<b>TOTAL</b>	<b>977</b>	<b>797</b>	<b>496</b>

La mayoría de los fabricantes importantes ofrecen Power IGBTs o disposiciones de éstos, adecuados para la conversión de energía. Sin embargo, el grupo europeo **Semikron** ofrece ya módulos trifásicos que incluyen no sólo una arquitectura de triple semipunto (ideal para conversión trifásica), sino, además, los circuitos de excitación aislados. Además, los IGBTs de Semikron poseen avanzadas geometrías de construcción, diodos volantes virtualmente perfectos, etc... Tales propiedades, unidas a un precio competitivo, colocan a estos los módulos en clara ventaja respecto a otras fórmulas constructivas, dejando finalmente poca duda en cuanto a la elección. Finalmente, se eligió el SKIIP 232 GD 120-313CTV como módulo de potencia para el inversor.

Otra de las características más importantes del inversor será el *hardware* de control sobre el cual delegará el microcontrolador para que realice las funciones principales que requieran una respuesta ultrarrápida. En definitiva, realizará el control de la conmutación de los IGBTs y funcionará como una interfaz rápida entre la etapa de potencia y el microcontrolador. El seguimiento del MPP lo llevará a cabo el microcontrolador Z-World BL-1700 el cual tendrá otra serie de funciones secundarias como, por ejemplo, la monitorización y supervisión del inversor.

## MONITORIZACIÓN Y CONTROL

Según se puede observar en el esquema general de la instalación, la comunicación entre los diferentes sistemas se puede resumir en los siguientes puntos:

Comunicación *Trackers* – PC Central

Comunicación Inversores – PC Central

Comunicación PC Central – Edificio ITER

El PC Central recibirá y enviará información vía RS-485 a los diferentes sistemas, sin descartar la posible incorporación de otros sensores y equipos de adquisición de datos que incorporen el protocolo de comunicaciones TCP/IP de Internet.

En cualquier caso, se dispondrá de un *software* especial que siga las recomendaciones de JRC-ISPRA para el caso de la monitorización y otro *software* (quizás incorporado en el de monitorización) que gestione de manera eficiente las comunicaciones.

Por otro lado, la comunicación entre el PC Central y el edificio del ITER será a través de una tarjeta WLAN connection IEEE802.11 modelo IMASDÉ ISA9801 CARD que va a una velocidad de 2 Mb/s.

## **PARTICIPANTES EN EL PROYECTO**

**Director Técnico:** Manuel Cendagorta

**Departamento de Fotovoltaica:** M<sup>a</sup> Paz Friend

Pablo Valera

Julián Monedero

**Departamento de Electrónica:**

Sergio González

Francisco Dobón

Anselmo Lugo

Daniel Baussou

Arcadio Sánchez

**Departamento de Sistemas:**

Francisco Pérez

Belén García

Ovidio López

Estudiantes de la Universidad de Kassel

**Departamento de Mantenimiento:**

Antonio Cordobés

Roberto Santos

Personal de mantenimiento