

# Medición del error de un haz de luz reflejado por un heliostato utilizando procesamiento de imágenes en Matlab

Salgado Plasencia Eugenio, Femat Díaz Aurora, Hernández Gutiérrez Alicia

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de Las Campanas, s/n, Las Campanas, 76010 Santiago de Querétaro, Querétaro, México

## Resumen

En las plantas termosolares de torre central, se genera energía eléctrica utilizando espejos llamados heliostatos para reflejar y concentrar la radiación solar hacia un colector ubicado en la parte alta de una torre. Debido a que esta reflexión se realiza a través de un lazo abierto, no existe ningún tipo de verificación de que la radiación solar incida en el objetivo deseado, por lo que los errores ocasionados por las aproximaciones realizadas en el cálculo de la posición solar pueden acumularse durante el funcionamiento del sistema y producir errores en la incidencia de la radiación solar. Utilizando procesamiento de imágenes se puede determinar el error en la incidencia de radiación solar sobre el objetivo, obteniendo la distancia entre el centroide de la mancha solar reflejada y el centro del objetivo. En este artículo se describe el uso de un algoritmo que carga la imagen de una mancha solar reflejada sobre un objetivo fijo y determina el error en la incidencia por medio de la obtención del centroide utilizando el software Matlab.

**Palabras clave:** energía solar, planta solar, heliostato, centroide, procesamiento de imágenes.

## 1. Introducción

Las centrales termosolares de torre central (STP, por sus siglas en inglés) tienen una serie de reflectores llamados heliostatos, que son capaces de seguir el movimiento del sol y concentrar la radiación solar en un receptor central montado en la parte superior de una torre, generando energía eléctrica mediante un ciclo termodinámico [1].

Los sistemas de seguimiento solar precisos tienen un papel importante en el rendimiento de las tecnologías de captación solar, ya que la cantidad de radiación solar absorbida por el colector determina la potencia de salida [2]. A pesar de la precisión de los algoritmos de seguimiento solar, el sistema de control se realiza a través de un lazo abierto, sin ningún tipo de verificación de que la radiación solar incida en el objetivo. Por lo que los errores debidos a las aproximaciones realizadas en el cálculo de la posición solar pueden acumularse durante el funcionamiento del sistema y producir errores en la incidencia de la radiación solar reflejada en el objetivo [3]. También existen errores en la reflexión de radiación solar en el objetivo, producidos por los heliostatos, debido a: tolerancias en la fabricación e instalación, errores en la alineación debido a cargas de viento y a fuerzas de gravedad que inciden sobre la estructura, ubicación dentro del campo, resolución y tipo de encoder, mala alineación en las facetas y el backlash del mecanismo [4].

Se ha utilizado procesamiento de imágenes para retroalimentar al sistema y determinar periódicamente el error acumulado en la incidencia de radiación solar sobre el objetivo, comparando el haz de incidencia con respecto a una referencia y reorientando el heliostato para reducir el error [5, 6].

En este documento se plantea la obtención del error en la incidencia de la radiación solar reflejada sobre un objetivo, utilizando procesamiento de imágenes para obtener el centroide del haz de luz reflejado por medio de momentos simples y determinar el valor del error.

## 2. Metodología

### 2.1 Descripción del problema

El problema que producen los errores sistemáticos en la operación de una STP, se manifiesta en una desviación de la mancha solar reflejada sobre el objetivo (Figura 1). La corrección de este desplazamiento consiste en comparar la posición del centroide del haz de luz reflejado sobre un objetivo con una posición de referencia, y así determinar el error en la incidencia de la radiación solar sobre el objetivo [5].

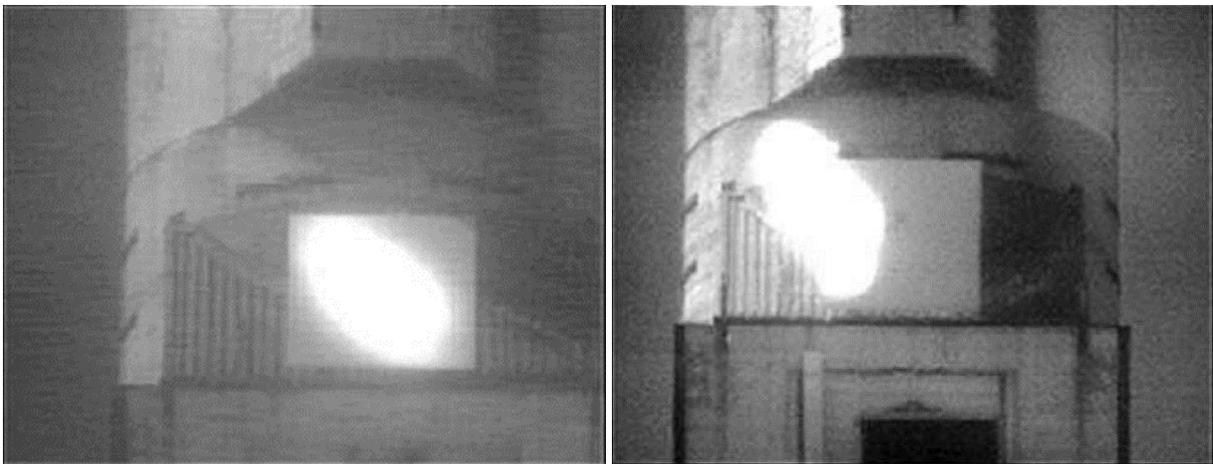


Figura 1. Haz de luz reflejado centrado (izquierda) y no centrado (derecha) [5].

Para determinar el error en la incidencia, se orienta un helióstato a la vez para reflejar la radiación solar sobre un objetivo dedicado a la tarea de corrección de desplazamiento y se captura una imagen (Figura 2).

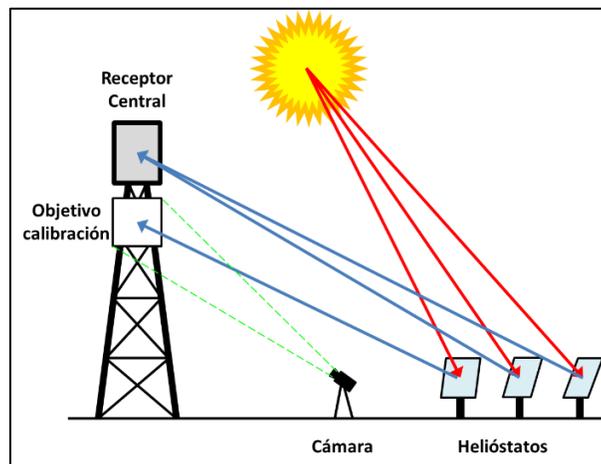


Figura 2. Obtención de la imagen de la mancha solar reflejada [5].

Las imágenes obtenidas sirven como información de retroalimentación que permite el cálculo automático de la distancia entre el centro del objetivo y el centroide de la mancha solar utilizando algoritmos de visión artificial, de tal manera que esta señal de error se puede utilizar para fines de ajuste [1].

## 2.2 Algoritmo para obtener el centroide

La metodología utilizada para obtener el error en la incidencia solar consiste en obtener el centroide de la mancha solar sobre un objetivo, siguiendo la metodología de Femat-Diaz, Vargas-Vazquez, Huerta-Manzanilla, Rico-Garcia and Herrera-Ruiz [7] ilustrada en la Figura 3.

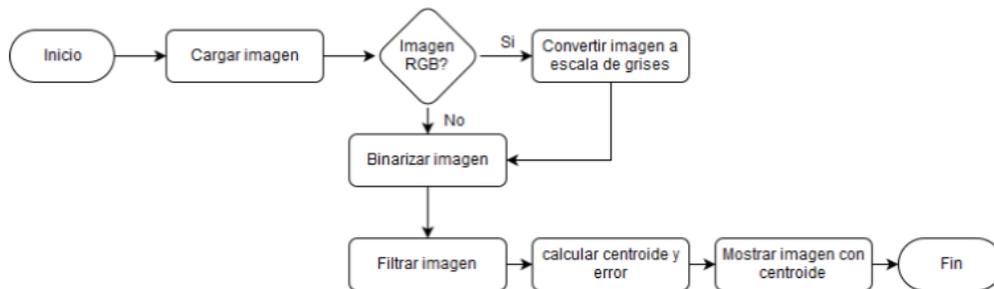


Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo

### 2.2.1 Imagen a escala de grises

Si la imagen cargada es una imagen RGB, entonces se obtiene una imagen en escala de grises, calculando el nivel de gris de cada pixel (GL) a partir de sumar el valor de las tres bandas de color del pixel (R=rojo, G=verde y B=azul), multiplicadas por tres coeficientes de distinto valor que simulan la detección del brillo de colores del sistema visual humano, la cual detecta mejor el color verde que el color rojo y el color azul.

El valor en escala de grises se obtiene de la siguiente ecuación [8]:

$$GL_{(x,y)} = 0.299 R_{(x,y)} + 0.587 G_{(x,y)} + 0.114 B_{(x,y)} \quad (1)$$

### 2.2.2 Imagen binaria

A partir de la imagen en escala de grises se obtiene una imagen binaria (BI), utilizando el método de umbralización de Otsu [9], el cual maximiza la varianza entre dos clases  $c_1$  y  $c_2$  para establecer un umbral óptimo  $T$ , donde todos los pixeles con valores menores a  $T$  tomarán un valor 0 (negro) y un valor de 255 (blanco) en caso contrario.

$$BI_{(x,y)} = \begin{cases} 255 \rightarrow GL_{(x,y)} \geq T \\ 0 \rightarrow GL_{(x,y)} < T \end{cases} \quad (2)$$

### 2.2.3 Filtrar imagen

Para eliminar el ruido de la imagen binaria se utiliza un filtro de mediana, el cual consiste en obtener la mediana de cada pixel, aplicando una matriz de filtrado de tamaño 3x3 que genera un nuevo valor mediante una función del valor original y los de los pixeles circundantes Pratt [10]. En el caso del filtro de mediana se obtiene la mediana de los 9 valores que envuelve la matriz y este valor se sustituye en la imagen en la misma posición del pixel central de la matriz (Figura 4).

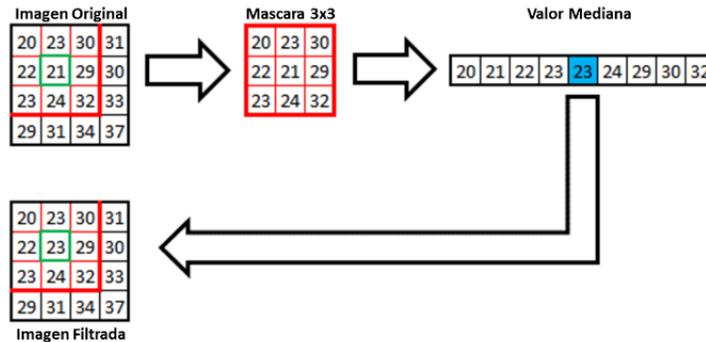


Figura 4. Filtro de mediana con mascara de 3x3.

#### 2.2.4 Obtención del centroide

El centroide la imagen binaria se obtiene a partir de los momentos simples [10]. Los cuales están dados por:

$$M(p,q) = \sum_x \sum_y x^p y^q f(x,y) \quad (3)$$

Dónde:  $x$  &  $y$  son las coordenadas del pixel, y  $f(x,y)$  es el valor en binario del pixel. Para calcular las coordenadas del centroide, se utilizan los momentos simples de orden cero y uno, con  $p=0$  y  $q=0$ ,  $p=1$  y  $q=0$ , y  $p=0$  y  $q=1$ , para obtener el área, la coordenada  $x$  y la coordenada  $y$  respectivamente.

$$area = M(0,0) = \sum_x \sum_y BI(x,y) \quad (4)$$

$$\bar{x} = \frac{M(1,0)}{M(0,0)} = \frac{\sum_x \sum_y xf(x,y)}{\sum_x \sum_y BI(x,y)} \quad (5)$$

$$\bar{y} = \frac{M(0,1)}{M(0,0)} = \frac{\sum_x \sum_y yf(x,y)}{\sum_x \sum_y BI(x,y)} \quad (6)$$

#### 2.2.5 Imágenes resultantes

Para visualizar la posición de la mancha solar sobre el objetivo, se agrega una marca de color rojo en las coordenadas del centroide de la mancha solar y dos ejes coordinados en color azul para marcar el centro de la imagen (Figura 5).

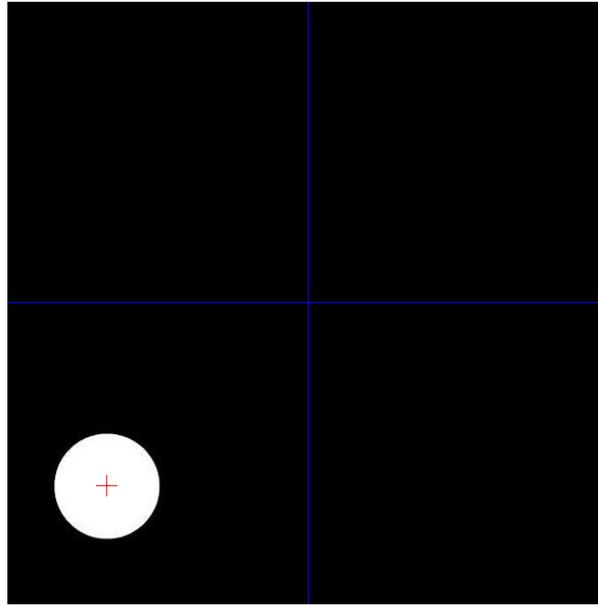


Figura 5. Imagen resultante.

### 2.3 Cálculo del error en la incidencia

Para determinar el valor del error en la incidencia, primero se calcula la distancia del centroide del haz de luz reflejado con respecto al centro de la imagen (D), tomando en cuenta la resolución de la imagen en píxeles (R) y las dimensiones del objetivo (l) en metros.

$$D_x = \frac{R_x}{l_x} \quad (7)$$

$$D_y = \frac{R_y}{l_y} \quad (8)$$

Finalmente se determina el ángulo de corrección del helióstato, a partir de la distancia de este con el objetivo (vector T) y la distancia del error en la incidencia.

$$\theta_x = \text{sen}^{-1} \left( \frac{D_x}{\|T\|} \right) \quad (9)$$

$$\theta_y = \text{sen}^{-1} \left( \frac{D_y}{\|T\|} \right) \quad (10)$$

## 3. RESULTADOS

El algoritmo se implementó en Matlab y se aplicó a dos tipos de imágenes, la primera imagen se obtuvo con una cámara CCD y la segunda con una cámara digital a color. En las imágenes solo se calculó la distancia del centroide con respecto al centro de la imagen, debido a que no se contó con los valores del tamaño del objetivo y de la distancia del helióstato con respecto al objetivo. Los resultados se muestran a continuación.

### 3.1 Imagen con cámara CCD

La imagen fue tomada en la Planta Solar de Hermosillo (PSH) utilizando una cámara CCD, en este caso, de la marca ALLIED Vision Technologies modelo Pike F-032, equipada con un sensor Kodak KAI-0340 CCD, que opera a una velocidad de 208 cuadros por segundo (Figura 6) [11]. La imagen tiene un tamaño de 725X601 pixeles y el centroide se ubicó en (-8,12) a una distancia de 14.4 pixeles (Figura 7).



Figura 6. Cámara Pike F-032.

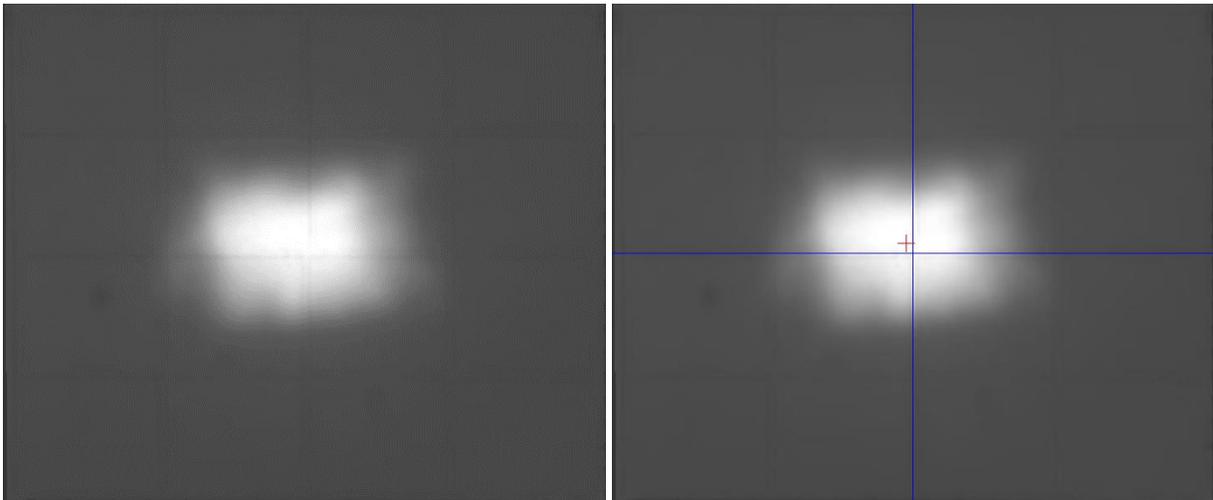
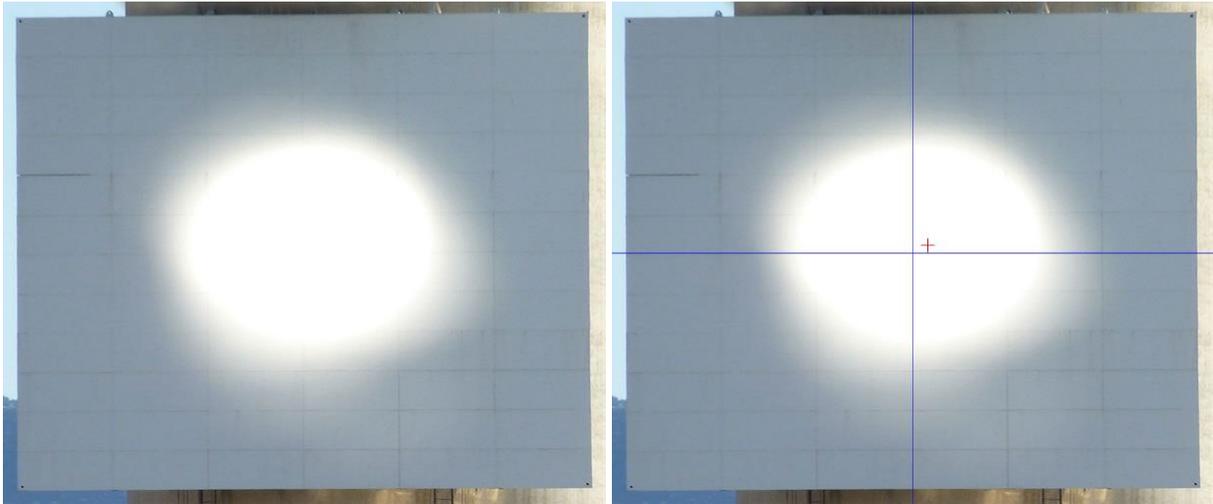


Figura 7. Imagen tomada con cámara CCD original (izquierda) e imagen con centroide (derecha).

### 3.2 Fotografía con cámara digital

La imagen es una fotografía digital tomada por la compañía Schlaich Bergermann und Partner, como parte de las pruebas de desarrollo del heliostato Stello [12]. La imagen tiene un tamaño de 910x762 pixeles y el centroide se ubicó en (23,12) a una distancia de 25.9 pixeles (Figura 8).

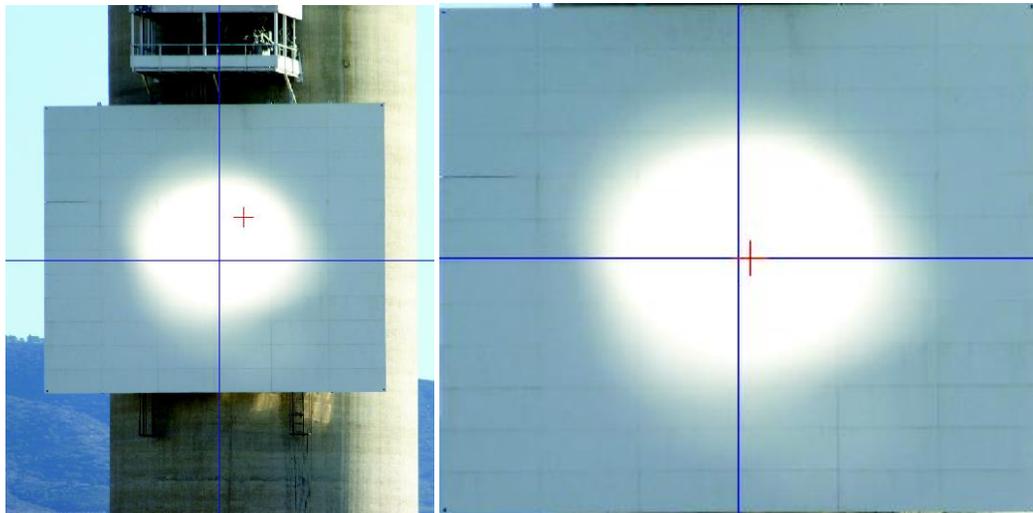


**Figura 8. Fotografía digital a color original (izquierda) e imagen con centroide (derecha).**

#### **4. CONCLUSIONES**

Los resultados muestran el valor del error en la incidencia solar por medio del cálculo del centroide de una imagen, a partir del algoritmo propuesto.

El algoritmo funciona tanto para imágenes tomadas con una cámara CCD como con imágenes digitales a color. Se tiene la restricción de que estas últimas deben estar enfocadas sobre el objetivo buscando evitar un error en el cálculo del centroide. Este error es debido al contraste que existe entre el objetivo y la imagen que lo rodea, tal y como se muestra en la Figura 9.



**Figura 9. Imagen digital amplia (izquierda) e imagen digital enfocada (derecha).**

También se debe tomar en cuenta que el error se mide desde el centro de la imagen y no necesariamente desde el centro del objetivo, por lo que se debe enfocar la cámara sobre la dimensión total del objetivo para tener un valor más preciso.

La siguiente parte de la investigación es desarrollar un algoritmo que ejerza la acción de control para corregir el error en la incidencia.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a CONACYT por el apoyo recibido, a la Planta Solar de Hermosillo (PSH) de la Universidad de Sonora y a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro por las facilidades otorgadas.

## REFERENCIAS

- [1] Camacho E.F., Berenguel M., Rubio F.R., and Martínez D., *Control of Solar Energy Systems*. Springer. 2012
- [2] Ruelas A., Velázquez N., González L., Villa-Angulo C., and García O., *Design, Implementation and Evaluation of a Solar Tracking System Based on a Video Processing Sensor*. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. 3(10): p. 172-178. 2013
- [3] Kribus A., Vishnevetsky I., Yogev A., and Rubinov T., *Closed loop control of heliostats*. Energy. 29(5-6): p. 905-913. 2004
- [4] Blanco-Muriel M., Alarcón-Padilla D.C., López-Moratalla T., and Lara-Coira M., *Computing the solar vector*. Solar Energy. 70(5): p. 431-441. 2001
- [5] Berenguel M., Rubio F.R., Valverde A., Lara P.J., Arahaj M.R., Camacho E.F., and López M., *An artificial vision-based control system for automatic heliostat positioning offset correction in a central receiver solar power plant*. Solar Energy. 76(5): p. 563-575. 2003
- [6] Malan K. and Gauché P., *Model based Open-loop Correction of Heliostat Tracking Errors*. Energy Procedia. 49: p. 2118-2124. 2014
- [7] Femat-Díaz A., Vargas-Vázquez D., Huerta-Manzanilla E., Rico-García E., and Herrera-Ruiz G., *Scanner image methodology (SIM) to measure dimensions of leaves for agronomical applications*. African Journal of Biotechnology. 10(10): p. 1840-1847. 2011
- [8] Baxes G.A., *Digital Image Processing. Principles and Applications*. Wiley. 1994
- [9] Otsu N., *A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms*. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. 9(1): p. 62-66. 1979
- [10] Pratt W.K., *Digital Image Processing: PIKS Inside*. 3 ed.: John Wiley & Sons, Inc. 2001
- [11] Iriarte-Cornejo C., *Automatización de sistema de control para campo de Helióstatos*, in *División de Estudios de Posgrado e Investigación*. Instituto Tecnológico de Chihuahua. 2013
- [12] SBP, *Point-focusing Solar Energy Technology. Stellio Heliostat confirms unprecedented optical and economic Stellio Heliostat confirms unprecedented optical and economic*. Schlaich Bergermann und Partner. 2015