

DISEÑO DE SISTEMAS COMERCIALES PARA LA TORRE SOLAR DE SUCCION  
ASCENDENTE-UTILIZACION DE FLUJOS CONVECTIVOS INDUCIDOS POR LA RADIACION  
SOLAR PARA LA GENERACION DE POTENCIA.

Jörg Schlaich,Rudolph Bergermann,Wolfgang Schiel,Gerhard Weinrebe.

Schlaich Bergermann y Sociedad (sbp gmbh)  
Hohenzollernstr.1,70178 Stuttgart,Alemania.  
tel.+49(711)64871-66  
Email.g.weinrebe@sbp.de

## Resumen

Una planta de potencia solar usando una torre de succión ascendente,algunas veces también llamada "Chimenea Solar" o "Torre Solar",es una planta de potencia solar térmica que utiliza una combinación de un colector solar de aire y un tubo central de succión ascendente para generar un flujo convectivo inducido por la radiación solar el cual proporciona presión a una plataforma de turbinas para generar electricidad.

Este trabajo presenta la teoría,experiencia prácticay la economía de las torres solares de succión ascendente:

primero se describe la teoría simplificada de la torre solar.Entonces los resultados del diseño,construcción y operación de un pequeño prototipo a escala en España se presentará.Después se presentará el problema técnico,los datos básicos económicos para sistemas de torres solares comerciales,como una que ha sido planeada para Australia .

## Introducción

La tecnología para el amplio uso de la energía renovable,debe ser simple confiable y accesible para los países menos desarrollados tecnológicamente que son soleados y frecuentemente tienen recursos de materia prima limitados.Y no necesitan agua de enfriamiento y la tecnología estaría basada en la producción medioambiental desde materiales renovables o reciclables.

La Torre Solar tiene estas condiciones.Los estudios económicos basados en la experiencia y conocimiento han permitido demostrar que las torres solares a gran escala > 100MW son capaces de generar electricidad a costos comparables a aquéllas plantas de potencia convencionales(Banderwerk y EVS,1997).esta es vrazón suficiente para el desarrollo de esta forma de utilización de la energía solar,con unidades grandes ,económicamente viables.En el futuro de la economía de la energía,las torres solares podrían ayudarnos a asegurar la provisión económica y medioambientalmente sustentable de electricidad en regiones soleadas.

La Torre de Succión Ascendente tiene 3 elementos esenciales:

- 1.-colector solar de aire
  - 2.-torre o chimenea
  - 3.-turbinas eólicas
- que han sido familiares por años.

sigue hoja 2

Su combinación para generar electricidad se describió en 1931(Günter,1931)  
.Haff(1983,1984) dá resultados de pruebas y descripción teórica del prototipo de la torre solar en Manzanares,España.

La transferibilidad de los resultados obtenidos en Manzanares es discutido por Schlaich y otros(1990).

El mismo autor proporciona un resumen( Schlaich 1995).Kreetz(1997) introduce el concepto de bolsas llenas de agua bajo el techo del colector de aire, para almacenamiento térmico.

Gannon y V.Backström(2000) presentaron el análisis del ciclo termodinámico de la torre solar y también un análisis de las características de las turbinas.

(V.backstrom y Ganon 2003).Ruprecht y otros(2003) dieron resultados de los cálculos de la dinámica del fluido y el diseño de las turbinas para una torre solar de 200 MW.

Unos análisis térmicos y técnicos enfocando los cálculos usando la computadora son descritos por Dos Santos Bernades y otros (2003).

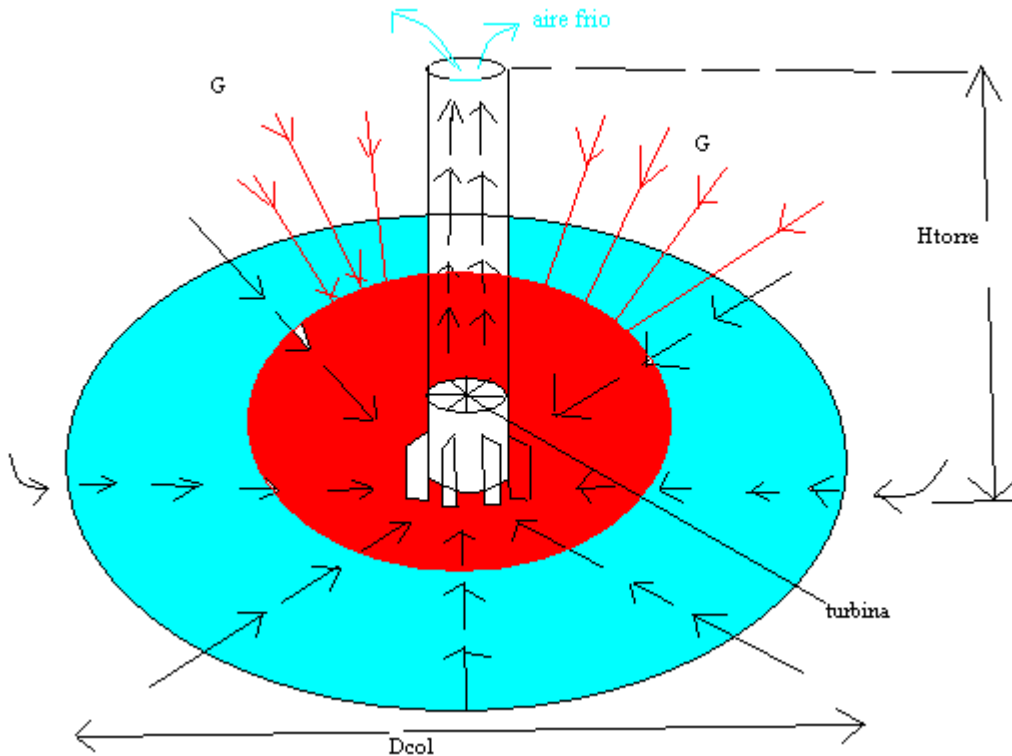
Para Australia,un proyecto de una torre solar de 200 MW es actualmente desarrollada(<http://www.enviromission.com.au>).Las condiciones en Australia son muy favorables para este tipo de planta solar térmica de potencia :los niveles de insolación son altos,(<http://www.bom.gov.au>),hay grandes áreas planas adecuadas de tierras disponibles,la demanda de electricidad se incrementa y el objetivo obligatorio enfocado a las energía renovables(MRET),requiere recursos de 9500 gigawatts hora de extra energía eléctrica renovable por año del 2010 al 2020(<http://www.mretreview.gov.au>).

## Principio de Funcionamiento

El principio de la torre solar,se muestra en la figura 1

sigue hoja 3

figura 1.principio de la torre solar



El aire es calentado por la radiación solar debajo de un círculo transparente o techo translúcido abierto en la periferia ;así este techo y el suelo natural debajo de él forman un colector solar de aire.En la mitad del techo está una torre vertical con grandes entradas de aire en su base.La unión entre el techo y la torre vertical es hermética. Como el aire caliente es más ligero que el aire frío,el aire caliente se levanta hacia la torre . La succión de la torre arrastra el aire caliente del colector y más aire frío entra desde el perímetro exterior.La operación continua de 24 horas puede ser alcanzada colocando tubos llenos de agua debajo del techo ya que el agua se calienta durante el día y libera el calor en la noche.Estos tubos se llenan solo una vez y no necesitan agua después. Así la radiación solar causa una constante succión ascendente del aire caliente en la torre. La energía contenida en la succión es convertida en energía mecánica por la presión de la plataforma de la turbina en la base de la torre en energía eléctrica en un generador convencional(Schlaich y Schield,2001)

sigue hoja 4

## POTENCIA OBTENIDA

Las correlaciones fundamentales y la influencia de los parámetros esenciales sobre la potencia obtenida de una torre solar son presentadas aquí en forma simplificada:

Generalmente hablando la potencia obtenida P de una torre solar puede ser calculada como la insolación solar multiplicada por las respectivas eficiencias del colector, la torre y la turbina, es decir:

$$P = Q_{\text{solar}} \cdot \eta_{\text{colector}} \cdot \eta_{\text{torre}} \cdot \eta_{\text{turbina}} = Q_{\text{solar}} \cdot \eta_{\text{planta}} = \text{watt}$$

..... ecuación 1

La energía solar que entra  $Q_{\text{solar}}$  en el sistema puede ser escrita como el producto de la radiación Global horizontal  $G_h$  y el área del colector  $A_{\text{colector}}$  así

$$Q_{\text{solar}} = G_h \cdot A_{\text{colector}} = \text{watt}$$

..... ecuación 2

La torre (chimenea) convierte el flujo de calor producido por el colector (corriente de convección) en energía cinética y en energía potencial (caída de presión en la turbina). Así la diferencia de densidad del aire causada por la elevación de la temperatura en el colector trabaja como una fuerza impulsora. la columna más ligera del aire en la torre es conectada con la atmósfera circundante en la base (dentro del colector) y la parte superior de la torre, y así se adquiere succión ascendente. Una diferencia de presión

$$\Delta P_{\text{total}} = g \cdot \int_0^{H_{\text{torre}}} (\rho_a - \rho_{\text{torre}}) dH$$

....ecuación 3

es producida entre la base de la torre (salida del colector) y el ambiente

que puede ser dividida en un componente estático y un componente

dinámico, despreciando las pérdidas de presión, es decir:

$$\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_{\text{estático}} + \Delta P_{\text{dinámico}} = Pa$$

..... ecuación 4

sigue hoja 5

hoja 5

La diferencia de presión estática decrece en la turbina, la componente dinámica es la energía cinética del flujo del aire.

Con la diferencia de la presión total y el flujo volumétrico del aire, si:

$$\Delta P_{\text{estático}} = 0 \text{ Pa}$$

la potencia total contenida en el flujo es:

$$P_{\text{total}} = \Delta P_{\text{total}} \cdot v_{\text{torremáxima}} \cdot A_{\text{colector}}$$

$$P := \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \text{m}^2$$

..... ecuación 5

donde:

$v_{\text{torremáxima}}$

... es la velocidad máxima del aire obtenida en la torre en m/s

$A_{\text{colector}}$

.... es el área del colector en  $\text{m}^2$

sigue hoja 5

hoja 5

así que el flujo volumétrico

$$Q_{\text{volumétrico}} = v_{\text{torremáxima}} \cdot A_{\text{colector}} = \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

La eficiencia de la torre puede obtenerse:

$$\eta_{\text{torre}} = \frac{P_{\text{total}}}{Q_{\text{solar}}}$$

..... ecuación 6

La subdivisión de la diferencia de presión entre los componentes estáticos y dinámicos depende de la energía tomada por la turbina. Sin la turbina una velocidad máxima en flujo de aire en la torre es alcanzada y toda la diferencia de presión es usada para acelerar el aire y así convertir en energía cinética, así:

$$P_{\text{total}} = \frac{1}{2} G_{\text{másico}} \cdot v_{\text{torremáxima}}^2 = \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

..... ecuación 7

sigue hoja 6

usando la aproximación de Boussinesq (Unger, 1988), la rapidez alcanzada por una corriente de convección libre puede ser expresada como:

$$v_{\text{torremáxima}} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{\text{torre}} \cdot \frac{\Delta T}{T_0}} = \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

..... ecuación 8

donde  $\Delta T$  es la elevación de la temperatura entre el ambiente y la salida del colector o entrada de la torre

$T_0$  ..... es la temperatura en la entrada de la torre

Así la eficiencia de la torre se puede obtener (Schlaich, 1995)

$$\eta_{\text{torre}} = \frac{g \cdot H_{\text{torre}}}{C_p \cdot T_0} = \frac{\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m}}{\frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot \text{K}}$$

..... ecuación 9

Esta representación simplificada explica una de las características básicas de la torre solar la cual es la eficiencia de la torre fundamentalmente depende de su altura. Para alturas de 1000m, la desviación de la solución exacta, causada por la aproximación de Boussinesq, despreciable. Usando las ecuaciones 1, 2 y 9

sigue hoja 6

encontramos que la potencia obtenida de la torre solar es proporcional al área del colector, la altura de la torre, esto es proporcional al cilindro de la figura 1. es decir como la potencia de las ecuaciones 1, 2 y 9

$$P = Q_{\text{solar}} \cdot \eta_{\text{colector}} \cdot \eta_{\text{torre}} \cdot \eta_{\text{turbina}} = Q_{\text{solar}} \cdot \eta_{\text{planta}} = \text{watt}$$

..... ecuación 1

sigue hoja 7

hoja 7

$$Q_{\text{solar}} = G_h \cdot A_{\text{colector}} = \text{watt}$$

..... ecuación 2

$$\eta_{\text{torre}} = \frac{g \cdot H_{\text{torre}}}{C_p \cdot T_o} = \frac{\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m}}{\frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot \text{K}}$$

..... ecuación 9

sustituyendo :

$$P = G_h \cdot A_{\text{colector}} \cdot \eta_{\text{colector}} \cdot \frac{g \cdot H_{\text{torre}}}{C_p \cdot T_o} \cdot \eta_{\text{turbina}}$$

Como la energía eléctrica obtenida de la torre solar es proporcional al volumen incluido dentro de la altura de la torre y del área del colector, la misma energía puede resultar de una gran torre con un colector de área pequeña y viceversa. Tan pronto sean incluidas las pérdidas por fricción en la simulación detallada, la correlación lineal entre la potencia de salida y el producto del área del colector por la altura no es estrictamente válido. aún es una buena regla que la longitud del diámetro no también es grande.

## EL COLECTOR

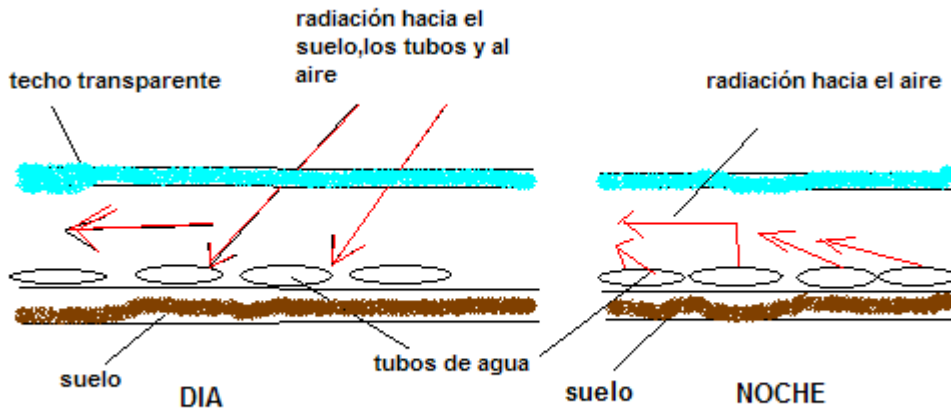
El aire caliente para la torre solar es producido por el efecto de invernadero en un simple colector de aire consistente de un vidrio o plástico entintado (vidrio transparente o plástico acrílico y policarbonato), entintados; extendido horizontalmente varios metros encima del suelo. La altura de la pared transparente se va incrementando cuando se va acercando a la base de la torre, así que el aire es dirigido en un movimiento vertical con mínima pérdida de fricción. La pared transparente admite la radiación solar y retiene la radiación reflejada de longitud de onda larga del suelo caliente.

Así el suelo debajo del techo se calienta y transfiere su calor al aire fluyendo radialmente desde el exterior al techo y hacia la torre calentándose el aire al pasar por el techo transparente.

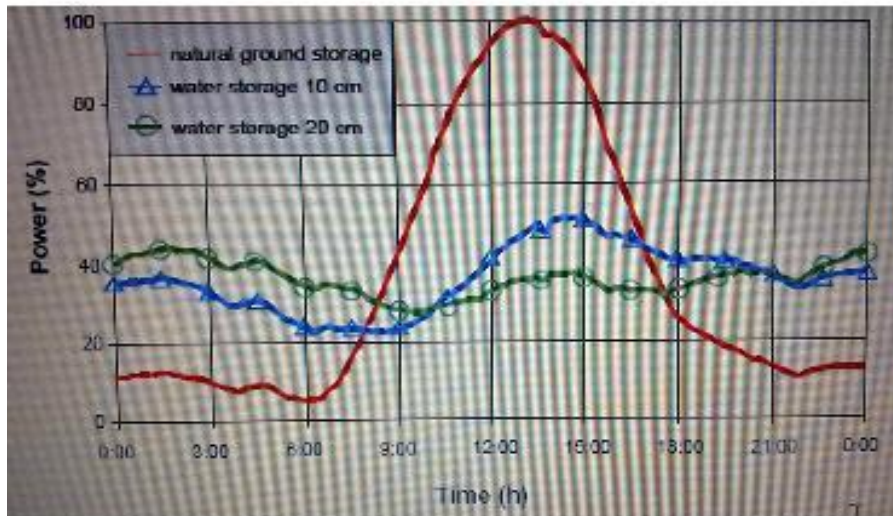
## ALMACENAMIENTO

Si se desea capacidad de almacenamiento adicional, se llenan tubos negros llenos de agua y acomodados de lado a lado en el suelo absorbiendo radiación debajo del colector en la operación diurna y radiando hacia el aire circundante en la operación nocturna (Kreutz, 1997). Los tubos se llenan de agua una sola vez y permanece en los tubos cerrados de forma que la evaporación no se lleva a cabo. figura 2. Principio del almacenamiento térmico con tubos llenos de agua

sigue hoja 8



El volumen del agua en los tubos se selecciona que corresponda a un nivel de agua con una profundidad de 5 a 20 cm dependiendo de las características de la potencia deseada en la salida. figura 3. Efecto del calor almacenado debajo del techo del colector usando tubos negros llenos de agua. Resultados de la simulación de Kreetz, 1997. donde: power es potencia, natural ground storage es almacenamiento natural en el piso, water storage 10 cm es almacenamiento en agua a 10 cm, water storage 20 cm es almacenamiento en agua a 20cm, time (h) es tiempo en horas.



En la noche cuando el aire en el colector comienza a enfriarse, el agua dentro de los tubos libera el calor que almacenó durante el día. El calor almacenado con el agua trabaja más eficientemente que con el suelo solo. puesto que aún a velocidades bajas -de la convección natural en los tubos- el calor transferido los tubos de agua y el agua es mucho más alto que entre la superficie del suelo y las capas de suelo debajo, y puesto que la capacidad calorífica del agua es 5 veces más alta que la del suelo.



## EL TUBO DE LA TORRE.

La torre misma la máquina térmica de la planta. Es un tubo de presión con baja pérdida de presión (como el tubo de presión de una estación de potencia hidráulica), por su relación de superficie y volumen. La velocidad del aire en la succión es aproximadamente proporcional al incremento de la temperatura del aire  $\Delta T$  en el colector y a la altura de la torre, de la ecuación 8. En una torre solar de multi megawatts el colector eleva la temperatura del aire entre 30 a 35 K.

Esto produce una velocidad de succión en la torre de solamente 15 m/s, a una salida nominal eléctrica, así la mayor proporción de la presión potencial disponible es usada por la turbina o turbinas y por eso no hay aceleración del aire. Así es posible entrar en una planta de torre solar para mantenimiento sin peligro de altas velocidades en el aire.

## LAS TURBINAS

Usando turbinas la producción mecánica en la forma de energía rotacional puede ser derivada de la corriente de aire en la torre.

Las turbinas en una torre solar no trabajan con una velocidad de inicio, como los convertidores de energía eólica de corrida libre, pero como los turbo generadores eólicos de una presión de inicio, en los cuales similarmente a una estación de producción hidroeléctrica, la presión estática es convertida a energía rotacional usando turbinas en un ducto. La potencia específica obtenida (potencia por unidad de área barrida por el rotor), de la la presión de inicio en la torre solar es aproximadamente la unidad de la magnitud más alta que la obtenida en la turbina eólica.

La velocidad del aire antes y después de la turbina es aproximadamente la misma. La producción alcanzada es proporcional al producto del flujo volumétrico por unidad de tiempo y la diferencia de presión en la turbina. (ecuación 5).

Considerando alcanzar la máxima energía producida se usa un sistema de control en la turbina para maximizar este producto en todas las condiciones de operación.

Para esto se tiene un sistema de control de inclinación en los álabes que es ajustado durante la operación para regular la potencia producida de acuerdo a las variaciones de la velocidad del aire y del flujo del aire. Si los lados planos de los álabes están perpendiculares al flujo del aire, la turbina no acciona. Si los álabes son paralelos al flujo del aire y el aire fluye a través de ellos sin disturbio, no hay caída de presión en la turbina y no se genera electricidad.

Entre estos dos extremos hay una posición óptima del álabe:

la producción es maximizada si la caída de presión en la turbina es de 80% de la diferencial de presión total disponible.

La fracción óptima depende en las características de la planta como las pérdidas de presión por fricción.

## EL PROTOTIPO

La investigación preliminar teórica detallada y numerosos experimentos en túnel de viento, permiten establecer una planta experimental con una producción máxima de 50 kW en un sitio proporcionado por la Unión Eléctrica Fenosa Española, en Manzanares (a 150 km al Sur de Madrid) en 1981/1982; que se muestra en la figura 4

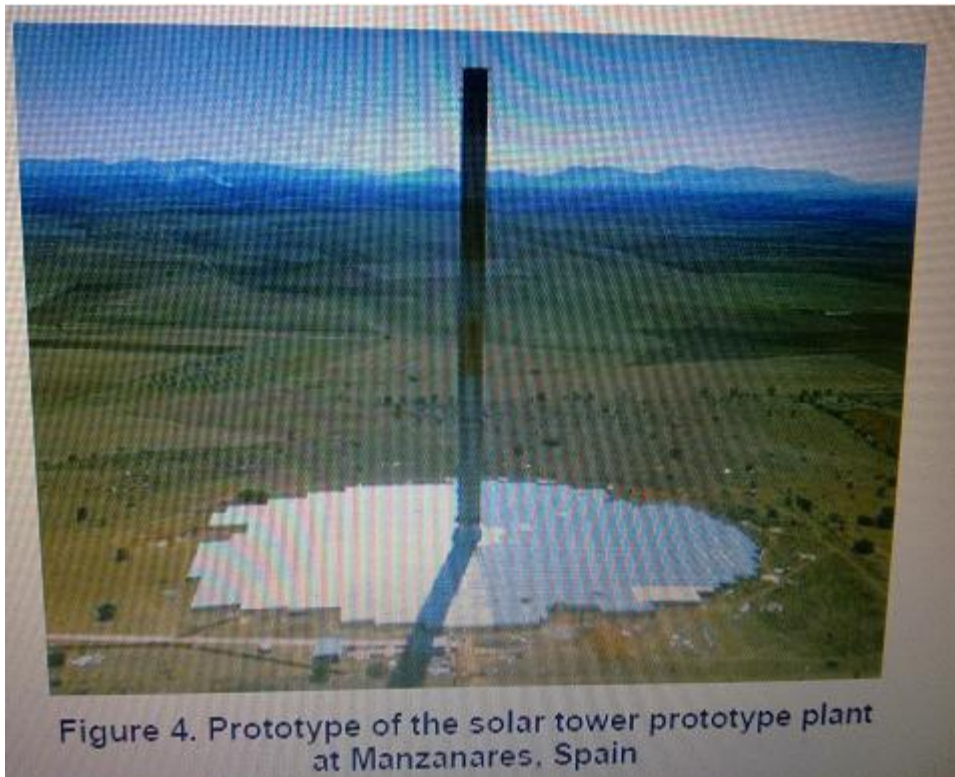


Figura 4. Prototipo de la Planta prototipo de la torre solar en Manzanares, España

Se realizó con fondos proporcionados por el Ministerio Alemán de Investigación y Tecnología en alemán (Bundesministerium für Forschung und Technologie), (Haaf y otros 1983, Schlaich y otros, 1990).

Los objetivos de este proyecto de investigación fué verificar, a través de mediciones de campo, el desempeño proyectado de los cálculos basados en la teoría, y examinar la influencia en la producción, de los componentes individuales en la planta y la eficiencia bajo las condiciones reales de ingeniería y condiciones meteorológicas.

Las principales dimensiones y datos técnicos de la instalación, se elistan en la tabla 1

altura de la torre: 194.6m

radio de la torre: 5.08m

radio del colector principal: 122.0m

altura promedio del techo: 1.85m

número de álabes de la turbina: 4

perfil del álabe de la turbina: FX W-151-A

relación de la velocidad del extremo del álabe a la velocidad de transporte del aire: 1:10

modos de operación: individual o conectada a la red.

incremento típico de la temperatura del aire en el colector:  $\Delta T = 20K$

potencia nominal: 50kW

colector cubierto con membrana plástica:  $40000m^2$

colector cubierto con vidrio:  $6000m^2$

La torre comprende un tubo atirantado de secciones trapezoidales que miden 1.25mm, con una profundida de corrugado de 150mm.

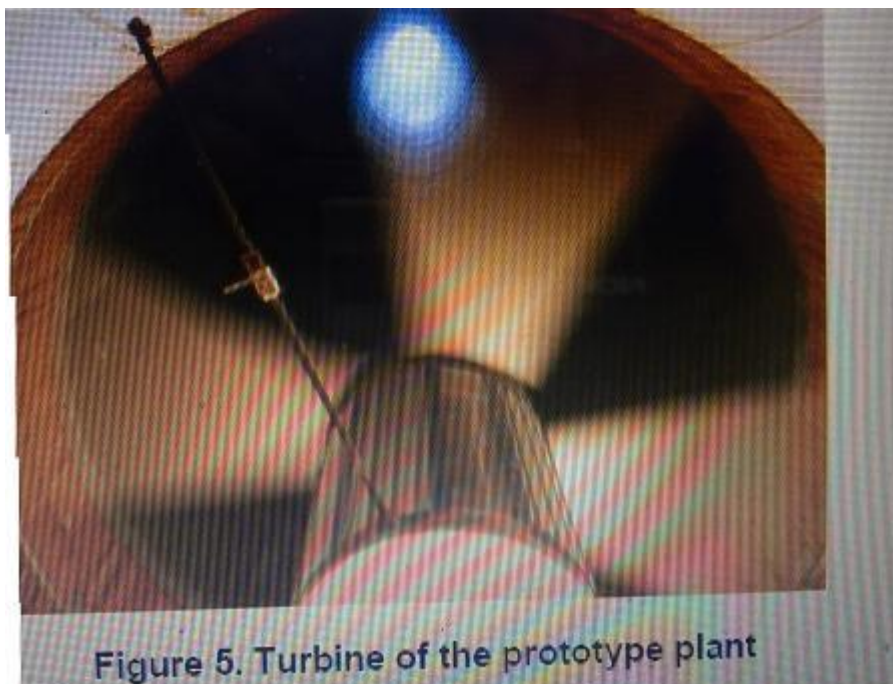
El tubo se sustenta en un anillo de 10 m sobre el nivel del suelo, este anillo es soportado por 8 columnas delgadas tubulares, así que el aire caliente puede fluir sin obstáculos en la base de la torre.

Una membrana preestirada de plástico forma un revestido para proporcionar buenas características de flujo, forma la transición entre el techo y la torre.

La torre es atirantada en 4 niveles y en 3 direcciones, la base está asegurada con un cimiento rocoso, la torre fué erigida al nivel del suelo, usando un método especial de elevación incremental desarrollado y propuesto por Bryant Hunt de SBP (Schlaid Bergermann y Sociedad). De la siguiente manera:

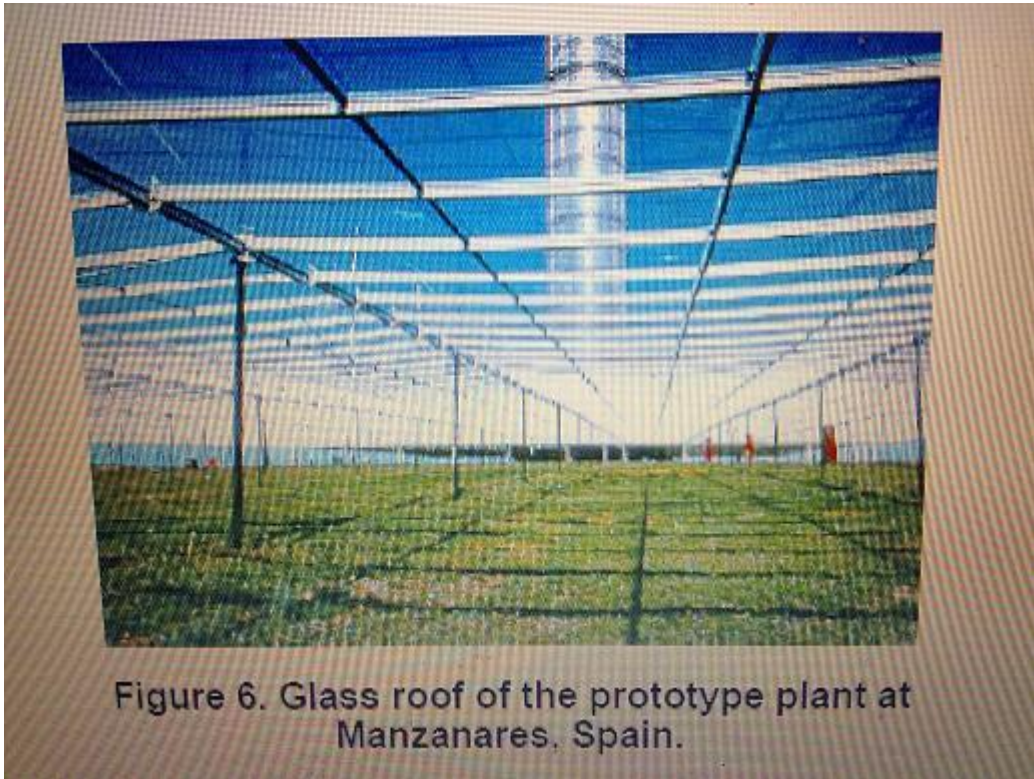
1º.- La sección superior de la torre fué instalada en el anillo de levantamiento en el piso y entonces es instalada en el anillo que la soporta por medio de una prensa hidráulica. Subsecuentemente las otras secciones son ensambladas en el piso conectadas a la sección instalada y entonces la torre entera es levantada. Así la torre completa fué construída en 20 maniobras de 10m cada una.

la turbina está soportada independientemente de la torre en un marco de acero de 9 metros sobre el nivel del piso, tiene 4 álabes los cuales son ajustables de acuerdo al perfil de velocidad del aire, considerando que se deba alcanzar una caída de presión óptima a través de los álabes de la turbina. la figura 5 muestra el prototipo de la turbina en la planta



La velocidad vertical del viento es de 2.5 m/s, de la ecuación 8, en el arranque y puede alcanzarse un máximo de 12.5 m/s, durante la operación de la turbina.

El techo del colector de la torre solar no solamente debe ser una cubierta transparente, debe ser durable y de buen precio, hay una gran variedad de tipos de películas de plástico así como el vidrio que fueron probados y se seleccionó el vidrio por ser mejor en costo y durabilidad. la figura 6. Muestra el techo de vidrio de la planta prototipo de Manzanares, España.



El vidrio resiste tormentas por muchos años sin dañarse y se ha probado que se limpia con la lluvia ocasional.

Las membranas de plástico están sujetas al marco y estiradas hacia abajo al piso en el centro de cada una usando un plato con perforaciones para el drenaje.

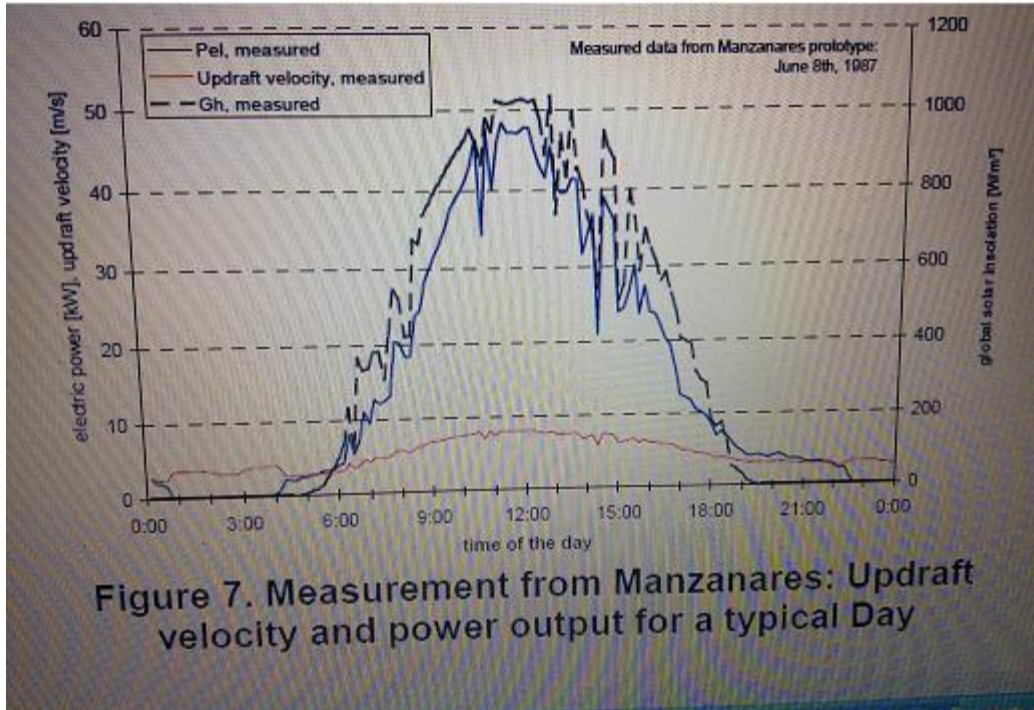
La inversión inicial de las membranas de plástico es más baja que el vidrio, sin embargo en Manzanares, estas se vuelven quebradizas con el tiempo y así tienden a desgarrarse. El desarrollo de materiales con estabilidad a las temperaturas y radiación UV, han mejorado en diseño, por ejemplo: membranas en domos en últimos pueden ayudar con esta ventaja.

La conclusión de la fase de construcción, en 1982, fue seguida por una fase experimental, el propósito de esta fue demostrar el principio de operación de la torre solar.

Los objetivos de esta fase del proyecto fueron:

- 1.-Obtener datos en la eficiencia del desarrollo tecnológico
- 2.-Demostrar que la operación de la planta completamente automática automática tiene alto grado de fiabilidad y
- 3.-registrar y analizar el comportamiento operacional y las relaciones físicas sobre la base de gran número de mediciones.

la figura 7 Muestra los principales datos operacionales, por ejemplo: insolación solar, la velocidad de la succión ascendente y la potencia eléctrica obtenida para un día típico.

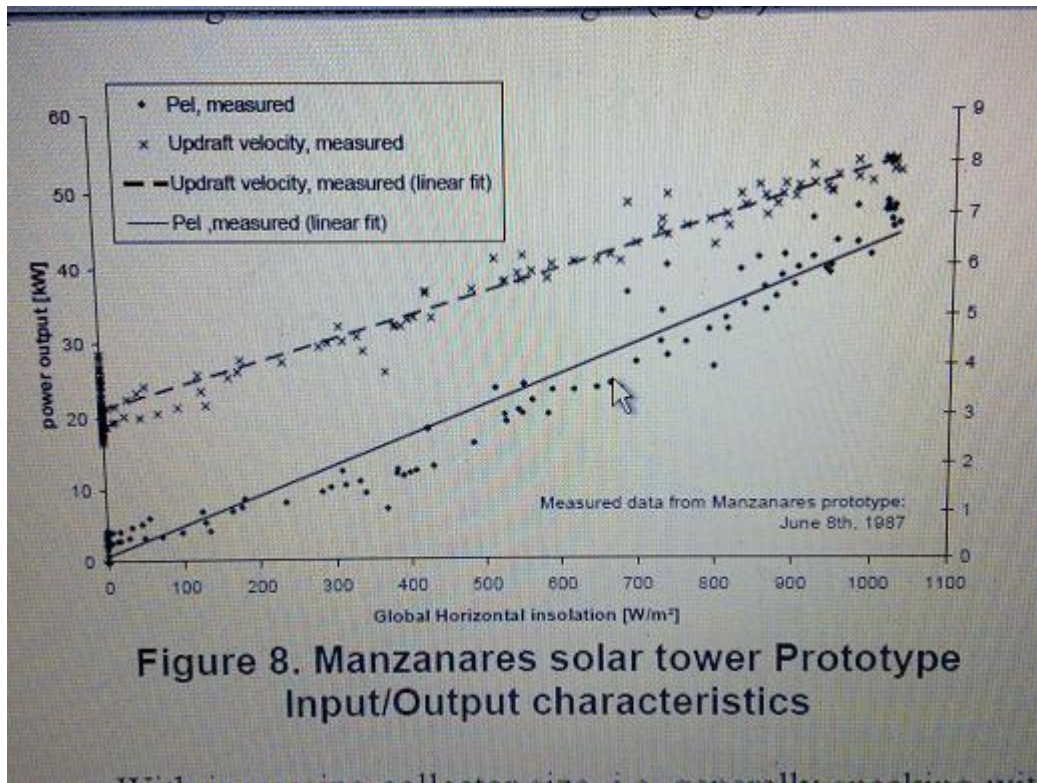


2 cosas se deben de señalar de estas observaciones:

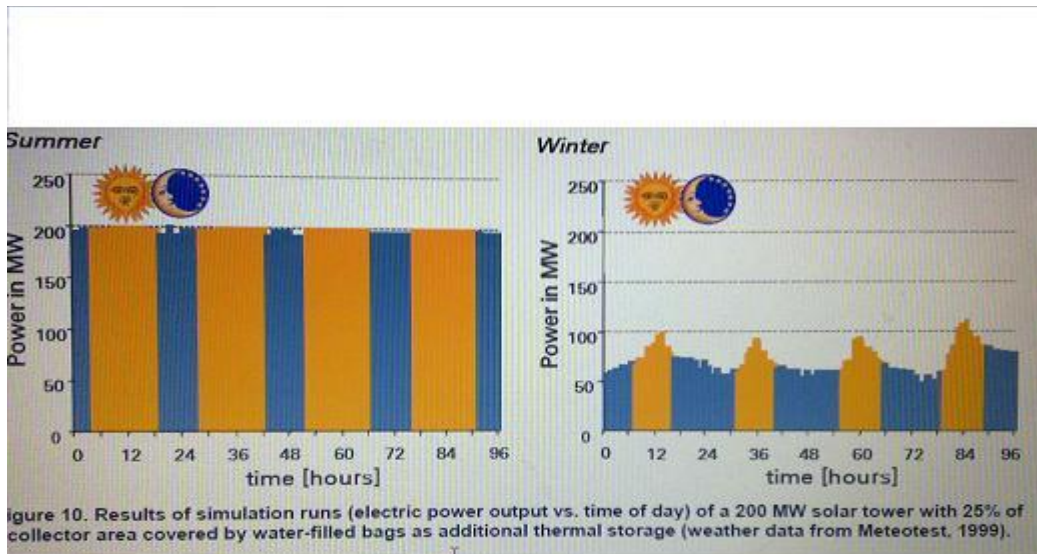
1º. Que la potencia de salida durante el día correlaciona muy cerca con la insolación solar, para esta planta pequeña sin almacenamiento adicional.

2º. -Hay una succión ascendente permanente durante la noche, la cual puede ser usada para generar potencia durante algunas horas de la noche.

La figura 8 presenta las características de entrada y salida del prototipo de la torre solar de Manzanares.



Con el incremento del tamaño del colector ,generalmente hablando se incrementa la inercia térmica del sistema,este efecto se observa en los resultados de la simulación obtenidos para plantas más grandes.ver figura 10



La figura 10 muestra los Resultados de la simulación realizada (de la potencia eléctrica producida relacionada con la hora del día) de una torre solar de 200 MW con 25% del área del colector cubierta con bolsas llenas de agua como almacenamiento térmico adicional(datos del medio ambiente proporcionados por Meteotest,1999)

Con el objetivo de llegar a entender completamente las relaciones físicas y desarrollar e identificar puntos de aproximación para posibles mejoras, fué desarrollado un código de simulación por computadora que describe los componentes individuales en su desempeño y su interacción dinámica. Este programa fué verificado sobre las bases de las medidas experimentales resultantes de Manzanares. Hoy es una herramienta desarrollada que toma todos los efectos conocidos y con la ayuda del cual, el comportamiento termodinámico en plantas a gran escala bajo condiciones meteorológicas pueden ser calculadas (Haaf, 1984, Weinrebe, 2000).

A mediados de 1986 y entrando a 1989, la planta fué operada sobre una base diaria, tan pronto como la velocidad del aire excede al valor típico de 2.5 m/s, la planta comenzó automáticamente y conectada automáticamente a la red pública.

Durante este período de 32 meses la planta operó completamente automática en 8.9 h x día. En 1987 se tuvo 3067 h y con una irradiación solar global horizontal de 150 W/m<sup>2</sup> en el sitio de Manzanares. El tiempo de operación total de la planta con una potencia neta positiva a la red fué de 3157 h, incluyendo 244h de potencia neta positiva entregada a la red en la noche.

Estos resultados muestran que el sistema y sus componentes son confiables y que la planta es eficiente y de operación altamente confiable.

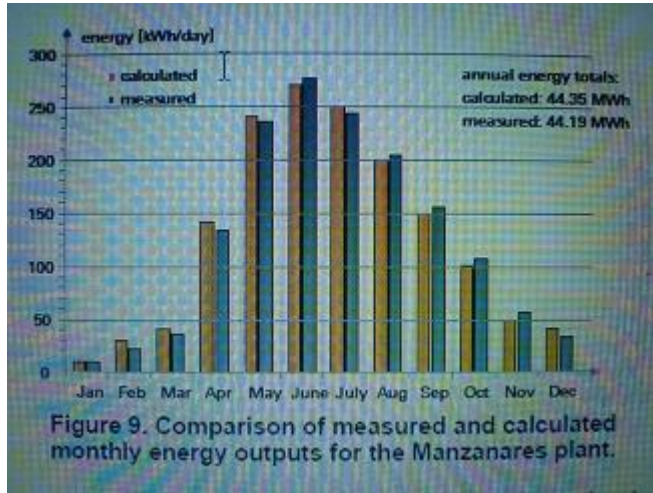
La inercia termodinámica es una característica principal del sistema. La continua operación a través de todo el día es posible y para sistemas mayores aún con fluctuaciones abruptas en el abastecimiento de energía, son efectivamente anulados.

Usando la simulación termodinámica tradicional codificada basándose en elementos finitos que resuelven las ecuaciones para la conservación de energía, momento y masa, fué calculado el desempeño teórico de la planta y los resultados comparados con las mediciones obtenidas. El código incluye simulación del desempeño del colector basado en la teoría estándar del colector (Duffie y Beckmann, 1991), extendido por la integración al sistema de los efectos del almacenamiento térmico del colector natural y si es requerido el almacenamiento térmico por bolsas llenas de agua en el modelo de (Kreutz, 1997).

La dinámica de fluidos del colector, la turbina y la torre son calculados tomando en consideración la fricción en los respectivos componentes del sistema.

El cálculo de las pérdidas de presión se apoya en los procedimientos estándar de cálculo (Asociación de Ingenieros Alemanes, 1998) y donde esto no es considerado que pueda ser aplicado o suficiente, en los datos experimentales incluyendo las pruebas del túnel de viento. El comportamiento de la turbina es modelado basándose en diseño de dinámica de fluidos computacional (DFC), los cálculos de diseño hechos por el Instituto de Dinámica de Fluidos y Maquinaria hidráulica de la Universidad de Stuttgart (Ruprecht, 2003).

La figura 9 muestra la comparación entre los resultados de energía medidos y calculados en promedio mensual, mostrando que no hay diferencia entre los valores medidos y calculados. En resumen se podría decir que los procesos ópticos y termodinámicos en la torre solar son bien entendidos y que los modelos han logrado un grado de madurez que reproduce en forma precisa el comportamiento de la planta en condiciones meteorológicas dadas.





## PLANTAS DE POTENCIA SOLARES COMERCIALES

**Modelado** .Las investigaciones detalladas soportadas por muchos experimentos en el túnel de viento,muestran que los cálculos para el colector,la torre y turbina son muy confiables para plantas grandes(Schlaich y otros,1990).

A pesar de la diferencia de área y volumen entre la planta piloto de Manzares,la instalación proyectada de 200 MW los factores clave termodinámicos son de tamaño similar en ambos casos.Usando la elevación de temperatura y la velocidad por ejemplo en el colector,la elevación de Manzanares fué de 17 K,con la velocidad de viento que fué de 12 m/s durante la operación de la turbina mientras los correspondientes promedios para la simulación de 200 MWes de 18 K y 11 m/s respectivamente.

Además las medidas tomadas de la planta experimental en Manzanares y el comportamiento termodinámico de la torre solar son consideradas para ser usadas para diseñar plantas más grandes es decir de producción mayor de 200 MW.

Resultados de tal simulación se muestran en la figura 10,anteriormente mostrada, de periodos de 4 días en verano e invierno.Esta planta con almacenamiento térmico adicional cubriendo el 25 % del área total del colector opera 24 h al día ,obteniendo una producción nominal en verano y una reducción significativa en invierno.

De esta manera el desempeño neto de la planta,día por día ,estación por estación,dado por la geometría y clima preescrito considerando todos los fenómenos físicos incluyendo una sola caspa o doble capa para el colector,sistema de almacenamiento pérdidas de presión en el colector,torre y turbina puede ser calculado con una precisión estimada de  $\pm 5\%$ .

## OPTIMIZACIÓN

La electricidad producida en una torre solar de succión ascendente es función directa de la intensidad de la radiación solar global,del área del colector y de la altura de la torre.Esto de hecho no es un tamaño óptimo para tales plantas.

Las dimensiones óptimas pueden ser calculadas solamente incluyendo el costo de los componentes específicos (colector,torre,turbinas),para sitios particulares.

Y así plantas de diferentes dimensiones óptimas serán construídas en diferentes sitios.Pero siempre en óptimo costo:Si el área del colector es barata y concreto caro entonces el colector será grande y la torre relativamente pequeña y si el colector es caro habrá un colector pequeño pero una torre alta.

## CARACTERISTICAS GENERALES DEL SISTEMA

Son 7 .La torre tiene varias características especiales:

1. .-El colector puede usar toda la radiación solar directa y difusa.Esto es crucial para países tropicales donde el cielo está frecuentemente nublado.
- 2.-Debido al suelo(la tierra) debajo del colector trabaja como un sistema natural de almacenamiento térmico,las torres solares de succión positiva pueden operar las 24 horas con pura energía solar y reducida producción en la noche.Si desea tubos o bolsas de agua adicionales se pueden usar bajo el techo del colector que absorben parte de la energía radiada durante el día y la liberan hacia el colector en la noche.Así las torres pueden operar como base en las plantas de potencia.El motor primario de la torre es la diferencia de temperatura en el aire(que causa una diferencia de densidades en el aire)entre el aire en la torre y el aire ambiente.

El aire ambiente de baja temperatura en la noche ayuda a conservar la producción al menos a un nivel constante, cuando la producción al menos a un nivel constante cuando la temperatura natural y el almacenamiento térmico adicional también decrece sin la radiación solar, así que la diferencia de la temperatura permanece prácticamente la misma.

3.-Las torres solares son particularmente confiables y no tiene riesgo de sufrir descomposturas en comparación con otras plantas, las turbinas y generadores, sujetos al flujo en estado permanente del aire, son las únicas partes móviles.

Esta simple y robusta estructura garantiza la operación que necesita poco mantenimiento y desde luego sin usar una gota de combustible convencional.

4.-No como otras plantas de potencia y como algunas otras plantas de potencia térmicas solares, no necesitan agua de enfriamiento, esto es una gran ventaja en muchos países que tienen grandes problemas con el abastecimiento de agua.

5.- Los materiales de construcción necesarios para las torres solares principalmente concreto y vidrio, están disponibles en cualquier lugar en suficientes cantidad.

De hecho con la energía tomada de la torre solar misma y la roca y arena disponible en el desierto, pueden ser reproducidas las torres en el sitio. (el vidrio se hace con arena).

La energía recupera la inversión en 2 o 3 años, (Weinrebe, 1999).

6.-Las torres pueden ser construídas ahora aún en los países industrialmente menos desarrollados, pues la industria actualmente disponible en la mayoría de los países es enteramente adecuada para los requerimientos de la torre solar. no se necesita en plantas de manufactura de alta tecnología.

7.- En los países pobres es posible construir grandes plantas sin inversión extranjera solo usando los recursos locales y fuerza de trabajo, esto crea un gran número de empleos con significativo capital de inversión y así el costo de la generación de electricidad.

**TORRES SOLARES.**-Sin embargo las torres solares tienen algunas características que las hacen menos apropiadas para algunos sitios:

A.-Requieren grandes áreas de terreno plano. Esta tierra podría estar disponible a bajo costo, lo cual significa que no pueden competir en el uso es decir, por ejemplo: agricultura intensiva por terreno.

B.- Las torres no son apropiadas para zonas sísmicas ya que su costo se incrementa drásticamente.

C.-Las zonas con frecuentes tormentas de arena deben ser evitadas pues se presentan pérdidas de eficiencia en el colector y su operación y los costos de mantenimiento se incrementarían sustancialmente.

### **TECNOLOGIA**

El diseño estructural de grandes plantas como la de Manzanares pueden ser usadas sin grandes modificaciones. Este diseño representa una solución probada, robusta y razonablemente económica.

La experiencia de Manzanares proporcionara datos de cálculo de costos.

Torres de 1000 m de alto es el reto, pero hoy se pueden construir.

Por ejemplo la Torre Nacional de Canadá de Toronto, Canadá es al menos de 600 m de alto y hay planes serios para la construcción de rascacielos de 2000 m en Japón que es zona sísmica.

En cambio para construir la torre solar es más simple pues es un cilindro hueco de gran diámetro y bajo pocas demandas constructivas en comparación con edificios habitados.

Hay diferentes maneras de construir esta clase de torres:

\*torre vertical de concreto reforzado

\*torre de tubos atirantados con forro de hojas de metal corrugadas

\*torre de diseño de red de cable con forro o membrana.

Estas estructuras son conocidas y han sido usadas en torres de enfriamiento por tanto no se necesita un desarrollo especial, con el soporte de contratistas internacionales con experiencia especial en la construcción de torres de enfriamiento.

La manufactura y procedimientos de erección fueron desarrolladas para varios tipos de torres de concreto y acero y sus costos fueron comparados. El tipo seleccionado dependerá del sitio: si hay suficientes materiales del concreto en el área y estudios anticipados sobre la sismicidad que demuestren que la aceleración sísmica es menor que 1/3 de la aceleración gravitacional de la tierra, entonces los tubos de concreto reforzado son los más apropiados. Ambas condiciones son satisfechas en todo el mundo en la mayoría de las zonas áridas que son adecuadas para las torres solares.

Investigaciones detalladas estáticas y estructurales muestran que es apropiado erigir la torre en varios niveles con arreglo de cables como radios en ruedas dentro de la torre, así que paredes delgadas pueden ser usadas. Pueden ser posibles formas nuevas comparadas con las otras estructuras.

Para el diseño mecánico es posible usar la experiencia de las estaciones de potencia hidro y eólicas, la tecnología de las torres de enfriamiento y la torre solar de Manzanares y sus años de operación. El arreglo de una turbina de eje vertical en la base de la torre podría ser vista como la solución más directa.

Los diseños comunes y la estimación de costos están basados en el arreglo de turbinas de eje horizontal en la periferia de la torre, pudiéndose usar los tamaños de turbinas existentes, particularmente por el tamaño del diámetro del rotor.

El diseño aerodinámico para el área de entrada y las turbinas fue logrado por medio de los experimentos de estudio de flujos en el túnel de viento y la dinámica computacional.

En la tabla 2, se muestran dimensiones típicas para las diferentes torres seleccionadas, sin almacenamiento adicional de agua caliente en bolsas o tubos.

capacidad	MW	5	30	100	200
altura torre	m	550	750	1000	1000
diámetro torre	m	45	70	110	120
diámetro colector	m	1250	2900	4300	7000
Potencia eléctrica <sup>A</sup>	GWh/a	14	99	320	680

nota :<sup>A</sup> en un sitio con una radiación solar global anual de 2300 kWh/m<sup>2</sup>a.

Los números están basados en materiales típicos y costos de construcción. Los costos para mano de obra no especializada en 5 euros/h (1 € = \$18.00 a \$20.00 julio 2009).

## ECONOMIA.

Se calcularon los costos de la inversión, basándose en costos específicos como dimensiones y producción eléctrica. tabla 2.

Con las respectivas producciones anuales de energía de las corridas de simulación, costos de energía eléctrica normalizados usando una relación de interés de 6% y un tiempo de depreciación de 30 años, se presentan los costos de inversión y costo de electricidad normalizado en la tabla 3.

capacidad		MW	5	30
100	200			
-----				
costo de la torre		Mio.€	19	49
170				156
costo del colector <sup>A</sup>		Mio.€	10	48
107	261			
costo de turbina		Mio.€	8	32
133				75
ingeniería,pruebas,misc.		Mio.€	5	16
42				40
<b>total</b>		<b>Mio.€</b>	<b>42</b>	<b>145</b>
<b>378</b>	<b>606</b>			
anualidad sobre inversión		Mio.€/a	2.7	10.2
43.7				27.1
costo anual operación y				
costo de mantenimiento		Mio.€/a	0.2	0.6
2.8				1.7
costo de electricidad				
normalizada <sup>B</sup>		€/ kWh	0.21	0.11
0.09	0.07			

Una variación de los parámetros financieros en la proporción del interés y tiempo de depreciación se muestra en la figura 11. El límite superior fué calculado para un tiempo de depreciación de 20 años el límite inferior de 40 años

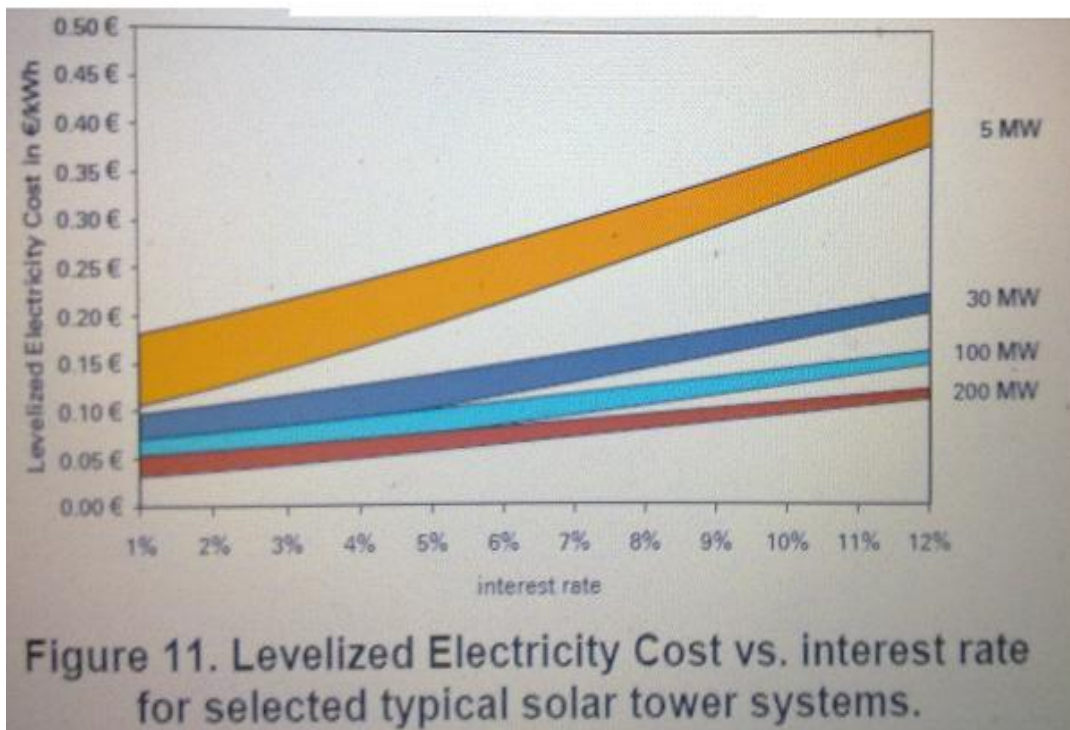
nota: <sup>A</sup> costo de mano de obra no especializada es de 5 €/h

<sup>B</sup> a un interés de 6% y un tiempo de depreciación de 30 años.

Mio es la abreviatura Mediterrean Information Office for Environment Culture and Sustainable Development es decir Oficina de Información Mediterránea para la Cultura Ambientalista y Desarrollo Sustentable,abreviado en inglés sería MIO-ECSDE

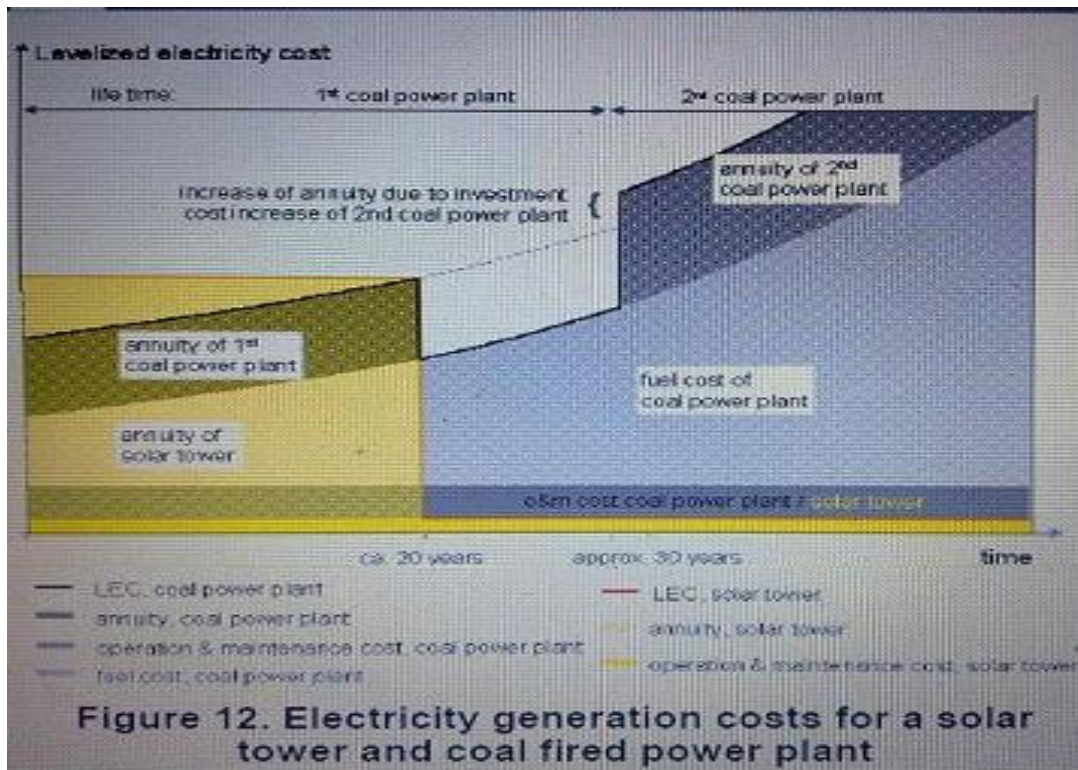
sigue hoja 21

enseguida está en la hoja 21 la figura 11



Como se esperaba los costos de generación de electricidad del capital intensivo de la torre solar están dominados por la proporción del interés. El tiempo de depreciación también tiene una influencia significativa. Asumiendo un interés de por ejemplo: 12% y un tiempo de depreciación de 20 años y costo de electricidad normalizado de 0.12€/kWh, para el sistema de 200 MW. Cuando por ejemplo un financiamiento de ingeniería ingenioso, con un interés del 6% y un tiempo de depreciación de 40 años es alcanzado el costo de la electricidad normalizado cae a 0.06€/kWh, la mitad del costo calculado antes.

Se tiene en la figura 12 una comparación esquemática y más general entre la generación de potencia usando una planta de torre solar.



En el ejemplo los costos de electricidad de la torre solar son más altos que los de la planta de carbón en los primeros años de operación. La diferencia entre los 2 costos de electricidad se acercan con el incremento de los costos del combustible fósil. Después de 20 años los costos de generación eléctrica son idénticos. Entonces ambas plantas ya están pagadas y para este ejemplo no se pagan anualidades. En este punto en el tiempo de la torre solar produce electricidad a bajo costo. y solo se tienen que pagar los costos de operación y mantenimiento. En contraste los costos de generación eléctrica de la planta de carbón permanecen altos comparativamente ya que son gobernados por los costos de combustible. En nuestro ejemplo, una nueva planta de carbón debe ser construida después de 30 años, donde la torre solar sigue operando con su configuración original. Esto refleja la diferencia del tiempo técnico de vida entre los 2 sistemas. así la diferencia en el costo entre la planta de carbón y la torre solar se incrementa. En el caso de la torre solar el pago del préstamo gobierna el costo de la electricidad mientras que en el caso de las plantas de carbón el costo variable del combustible es el factor más importante. En el ejemplo mostrado en la figura 12, la tasa de interés y escalamiento del precio fueron deliberadamente escogidos en tal forma que los costos calculados de electricidad son idénticos para ambas plantas exactamente después del tiempo de depreciación. En realidad dependen del costo actual y datos de financiamiento esto puede tomar más tiempo hasta que la paridad del costo sea alcanzado pero este punto puede ser alcanzado antes.

En los países con bajos sueldos en los costos de inversión y además la mayoría de los costos de generación de energía de la torre solar, se verán reducidos. Esto se mantiene especialmente cierto en el colector, el cual solo contiene la mitad de los costos de inversión en la torre solar, es un componente de baja tecnología y puede ser construido con mano de obra no especializada

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

La torre solar de succión positiva trabaja en un simple y probado principio, su física está bien entendida. Como su eficiencia termodinámica de la planta se incrementa con la altura de la torre tales plantas tienen que ser competitivas en costo.

Las grandes plantas significan altos costos de inversión los cuales se deben la mayoría de ellos a los costos de la mano de obra. Esto crea puestos de trabajo y altos productos netos domésticos para el país con un incremento de entrada de impuestos y costo social reducido (= dignidad humana, armonía social) y no se consumen combustibles fósiles, además de la reducción de la dependencia en aceites y carbón, lo cual es beneficioso para los países en desarrollo liberando sus medios de su desarrollo.

Esta planta de torre solar no es agresiva a la ecología y no consume recursos naturales, aún en su construcción, ya que la torre solar consiste en concreto y vidrio, lo cual son hechos de arena y piedras más su propia energía.

Consecuentemente en áreas desiertas, con inacabable arena y piedra-las torres solares pueden reproducirse a sí mismas.

Una verdadera fuente de energía renovable!!!!

## RECONOCIMIENTOS

Queremos agradecer al Ministerio Federal de Investigación y Tecnología Alemán de abreviatura en alemán es BMFT (Bundesministerium fuer Forschung und Technik), por la obra de Manzanares, a los inversionistas y al grupo EnviroMission por su trabajo para hacer las torres solares una realidad.

Por último no menos importante a la empresa Schlaich Bergermann y Sociedad (SBP), en su oficina en Stuttgart por su constante apoyo del grupo de energía solar de SBP.

### Nomenclatura

#### Latino

A	..... área	$\left( m^2 \right)$
G	.....radiación solar global	$\left( \frac{W}{m^2} \right)$
G <sub>h</sub>	.....radiación solar horizontal	$\left( \frac{W}{m^2} \right)$
H	.....altura de la torre	(m)
P	.....Potencia	(W)
Q	.....flujo de calor	(W)
T	.....temperatura	K

$C_p$	.....calor específico	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	
$g$	.....aceleración gravitacional	$9.81 \frac{m}{s^2}$	
$G_{m\acute{a}sico}$	.....gasto m\acute{a}sico	$\frac{kg}{s}$	
$p$	.....es la presi3n	$Pa$ pascal	..... $\frac{N}{m^2}$
$v$	.....velocidad	$\frac{m}{s}$	

### GRIEGO

$\rho$ (ro)	densidad del fluido	$\frac{kg}{m^3}$
$\eta$ (eta)	eficiencia	

### PREFIJOS

$\Delta$  .....cambio en valor

#### SUBSCRITO

$o$  .....en el nivel del banco

$a$  .....ambiente

$co]$  .....colector

$d$  .....din\mico

$h$  .....horizontal

$s$  .....est\atico

$tot$  .....total

$max$  .....m\aximo

### REFERENCIAS

-Badenwerk A.G.y Abastecimiento de energ\u00eda Swabia.A.G(1997).Aspectos t\u00e9cnicos y Econ\u00f3micos para el an\alisis de las plantas de potencia de succi3nascendente-reporte Interno.Kartsrube/Stuttgart.

-Dos Santos Bernardes M.A. voB A.Weinrebe G(2003).An\alisis t\u00e9rmico y t\u00e9cnico de las chimeneas solares.Energ\u00eda Solar.75,511-524.



- Duffie J.A. y Beckman W.A.(1991).Ingeniería de los Procesos térmicos Solares.2ª ed.Wiley interciencia.N.York.
- Ganon,A.J.,Backström,T.W(2000).Análisis del ciclo de la Chimenea solar con sistema de pérdidas y desempeño del colector solar.Revista de ingeniería de energía solar,122(3),133-137.
- Günther,H(1931).,En 100 años.el futuro del abastecimiento de la energía eléctrica del mundo.Compañía Cosmos.Grupo Ecológico,publica la acción doméstica,Stuttgart. Sociedad de Amigos de la Naturaleza y la Revista Cosmos,Stuttgart.
- Haaf,W(1984).Torres Solares,Parte II:Resultados de la prueba preliminar de la Planta Piloto de Manzanares.
- Kreutz,H(1997)Análisis teórico e interpretación de depósitos temporales para las torres de potencia de succión ascendente.Tesis.Universidad Técnica de Berlin.
- Pruebas Meteorológicas(1999).METEONORM 4.0.Oficina Federal Suiza de Energía,3003 Bern.
- Ruprecht,A.y otros(2003).Diseño Dinámico de Fluidos de la planta de potencia solar de succión ascendente.actas de los simposios internacionales sobre el uso de la informática y las matemáticas en arquitectura y la industria de la construcción.junio 10-12.Universidad de Bauhaus,Weimar,Alemania.
- Schlaich,J(1995).La Chimenea Solar,edición Axel Menges,Stuttgart,Alemania.
- Schlaich J,Schiel W,y Kiera,M(1990).Enciclopedia de Ciencia Física y Tecnología.3ª ed.Prensa Académica,Londres.
- Schlaich, J., Schiel, W., Friedrich, K., Schwarz, G., Wehowsky, P., Meinecke, W., and Kiera, M. (1990).Reporte final sobre la producción de trabajo de la corriente de succión ascendente y su transferencia a gran escala sobre la instalación de Manzanares.BMFT(Ministerio Federal de Investigación y Tecnología)-Patente 0324249D, Stuttgart.
- Unger J(1988).Corriente de convección.editora Teubner,Stuttgart.
- Sociedad de Ingenieros Alemanes(1988).VDI-Compañía de Ingeniería de procesos y de Ingeniería Química(GVC)Atlas de Insolación VDI,Spinger,Berlin.
- Von Backström,T.W y Ganon,A.J(2003).Características de la Turbina de la Chimenea Solar.Energía Solar,76(1-3)235-241.
- Weinrebe,G(2000).Simulación de la Chimenea Solar.Agencia Internacional de Energía(IEA).Exposición de la Agencia Internacional de Energía-Solar Paces Tarea III,dentro Taller de Sistemas de Potencia Térmicos Solares del 28-29 de Septiembre en Colonia,Alemania.
- Weinrebe,G(1999).Mitigación de los gases de Invernadero con plantas de Potencia Solares Térmicas.Expuesto en la Conferencia Europea de Generación de Potencia,en Frankfurt,Alemania(1999).Junio 1-3.
- Weinrebe G y Schiel W(2001)Torre solar de Succión Ascendente y Energía de la Torre de Succión Descendente.Una comparación.Exposición en el Congreso Mundial Solar de la Sociedad Internacional de Energía Solar en Adelaida,Australia.

Aportación del traductor, Ing. Horacio Vidaña Cepeda, catedrático del Departamento de Metal-Mecánica, con 30 años de antigüedad en el Instituto Tecnológico del Istmo, también con 35 años de antigüedad en la Secretaría de Educación Pública y Jefe de Proyectos de Investigación del Departamento de Metal-Mecánica



El interés de hacer la traducción de este artículo, es por el análisis de los principios científicos y tecnológicos de la Planta de Potencia de torre de succión ascendente para la producción de energía que como se menciona es muy sustentable en la producción de energía y en cuanto a que se puede usar el área del colector como invernadero para la producción agrícola.

Además que este dispositivo se está proyectando su implementación en otros países preocupados por el extensivo uso de las fuentes de agua y su contaminación, además de la contaminación ecológica.

Así se tiene en Australia en Buronga, Irán, el caso de Botswana, en las regiones noroeste de China, en la República de Namibia al suroccidente de Africa, Ciudad Real en España, en donde se pretende que la torre sea más alta, mayor de 1 km, pues en los análisis se encuentra que la velocidad del aire en la succión ascendente es proporcional a la raíz cuadrada de esta altura y áreas rurales de países en desarrollo.

Desde luego es una opción más para la producción de energía y existen estudios sobre su implementación en ciudades con contaminación de aire, en el mar pues serviría el colector como granja de acuicultura.

Enseguida presento una imagen donde se muestra las proporción en altura de las torres del mundo y la torre de Ciudad Real o Fuente de Fresno.

aquí aparecen el Burj en Dubai de 800 m, la torre solar de Cd. Real en España de 750 m, el mástil de Omega de 427 m es una antena de comunicaciones en Darraiman, Victoria Australia, La torre Solar de Buronga, Australia de 400m, la Pirámide de Gizeh de 137 m, la torre Eiffel de 320 m, la torre Sears de 442 m, El edificio Imperio estatal (Empire State Building), de 381 m en Nueva York, la torre CN de Canadá de 533 m, la torre de Taipei de 509 m, la chimenea de Kazakastan de 420 m de una planta térmica Gres-1, el edificio Q1 Número uno de Queensland Australia de 322 m, y la torre Eureka edificio residencial de 509 m en Melbourne, Australia.

