

Modelo Dinámico de una Planta de Generación con Chimenea Solar

Imbaquingo C.*; Domínguez X.**

*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador

e-mail: carlos.imbaquingo@epn.edu.ec

**Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador

e-mail: xavier.dominguez@epn.edu.ec

Resumen: Una Planta de Generación de Chimenea Solar (SCPP) produce energía eléctrica gracias a que un conjunto de turbinas aprovechan la energía cinética del viento, producto de la diferencia de presiones entre la base y la cima de una chimenea que se encuentra rodeada y unida herméticamente a un colector que absorbe la irradiación solar, provocando que el aire en su interior que circula desde el perímetro abierto del colector hacia la cima de la chimenea se caliente, incrementando de esta manera el efecto de flotabilidad del aire.

En este documento se presenta una propuesta de diseño de una SCPP en donde se estudia su desempeño de acuerdo a las condiciones ambientales, los materiales, el tamaño y dimensiones de la planta y el espacio que ocupan las turbinas, representado como la relación entre las áreas transversales de la chimenea y el conjunto de secciones de transición colector-chimenea. Basado en esta idea se analiza el comportamiento de la planta de dimensiones conocidas en estado estable para deducir los puntos de máxima potencia, posteriormente se estudia la respuesta del sistema en estado transitorio con el fin de obtener un modelo dinámico de la SCPP. Finalmente se propone un método de control para mantener a la planta en el punto de máxima potencia bajo diferentes niveles de irradiación.

Palabras claves: Chimenea Solar, Energía Solar Térmica, Energía Renovable.

Abstract: A Solar Chimney Power Plant (SCPP) produces energy through a set of wind turbines. The wind is created due to drop pressure between the base and the top of the Chimney that is surrounded and sealed hermetically by a solar irradiation collector. The wind, which moves from the opened collector border to the top of the chimney, is heated. Thus, the air buoyancy effect is increased. It is herein detailed a SCPP design which analyzes its performance, considering environmental conditions, materials, power plant size and cross sectional area of the turbines. A relationship is established between the cross sectional area of the set of turbines and the chimney cross sectional area. Having defined this idea, it is analyzed the SCPP behavior in steady state to derive the peak power points. Next, in order to establish a SCPP model dynamic, it is evaluated the transient response of the system. Finally, a control system is proposed to achieve working on the peak power points.

Keywords: Solar Chimney Power Plant, Solar thermal Energy, Renewable Energy.

1. INTRODUCCIÓN

Una Planta de Generación de Chimenea Solar (SCPP por sus siglas en inglés) combina tres conocidas y antiguas tecnologías: el efecto invernadero, el efecto succión de una chimenea y molinos de viento. En consecuencia, una SCPP está conformada por un colector de cubierta de vidrio, una chimenea y turbinas de viento, como se aprecia en la Figura 1.

La irradiación solar es la responsable del incremento de temperatura del aire bajo la cubierta del colector, el cual se encuentra abierto en el perímetro para permitir el flujo de aire del ambiente hacia la planta. En el medio del colector se encuentra una chimenea vertical con grandes entradas de aire en la base cuya unión con el colector es hermética.

El aire caliente se eleva debido a que es más ligero que el frío, y conjuntamente por la diferencia de presiones entre la base y la cima de la chimenea se produce el efecto succión, produciendo así la salida de aire caliente

Artículo recibido el 15 de Diciembre, 2014; revisado XX julio de 2014. (Escriba la fecha en que presentó su documento para su revisión).

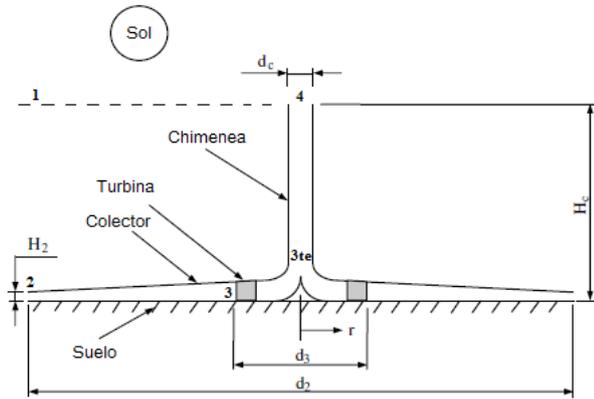


Figura 1. Esquema de una SCPP [1]

por la cima de la chimenea e ingreso de aire frío por el perímetro del colector. Es decir que la irradiancia solar provoca al final una corriente de aire ascendente en la chimenea y de forma radial en el colector. La energía que contiene este flujo de aire es aprovechada por turbinas de viento colocadas en la base que generan energía mecánica rotativa y posteriormente energía eléctrica.

La SCPP tiene notables ventajas con respecto a las otras tecnologías de producción de energía de acuerdo a Bernardes [2], las cuales se citan a continuación:

- El colector utiliza irradiancia directa y difusa.
- El suelo proporciona almacenamiento térmico natural.
- La poca cantidad de equipos mecánicos asegura su fiabilidad.
- No se utiliza un sistema de enfriamiento de agua.
- El área que cubre el colector puede ser utilizada para la agricultura.
- Para la construcción se utiliza materiales simples y tecnologías conocidas.
- Los países no miembros de la OECD pueden implementar esta tecnología sin esfuerzos tecnológicos costosos.

1.1 Colector

El efecto invernadero se produce debajo de la cubierta de vidrio o plástico que conforma el colector, cuya altura se incrementa de forma radial desde el perímetro hasta la base de la chimenea de modo que el aire se desvía hacia el movimiento vertical con mínimas pérdidas de fricción. La cubierta permite el paso de las componentes de irradiancia de corta longitud de onda, y retiene las

componentes de mayor longitud de onda, provocando que el suelo bajo el colector se caliente y transfiera su energía al flujo de aire radialmente por encima de él desde el exterior hacia la chimenea [3].

1.2 Chimenea

La chimenea propiamente dicha es la máquina térmica. Se trata de un cilindro con bajas pérdidas por fricción debido a su óptima relación superficie-volumen.

El empuje ascendente del aire caliente del colector es aproximadamente proporcional al aumento de la temperatura del aire ΔT en el colector y al volumen de la chimenea. En SCPP de gran escala se consiguen valores de $\Delta T = 35\text{ }^\circ\text{C}$, lo cual produce velocidades ascendentes de 15 m/s .

La eficiencia de la chimenea, es decir la conversión de la energía térmica en cinética, es prácticamente independiente del aumento de la temperatura del aire $\Delta T = T_3 - T_2$; es esencialmente determinado por la altura de la chimenea H_c y la temperatura del ambiente T_2 (Figura 1) a nivel del suelo, mientras menor es la temperatura T_2 mejor eficiencia; es por eso que la SCPP aprovecha el bajo aumento de la temperatura durante la noche. Sin embargo, comparando las eficiencias del colector y las turbinas, la eficiencia de la chimenea es relativamente baja. Para mejorar el desempeño de la SCPP la altura de la chimenea debe ser considerable [3].

1.3 Turbinas

Las turbinas de una SCPP se encuentran canalizadas, y de forma análoga a una planta hidroeléctrica se convierte la presión del aire en energía rotacional. La potencia de salida lograda es proporcional al producto entre el caudal y la caída de presión en la turbina.

Se realiza control por paso de pala durante la operación para regular la potencia de salida de acuerdo al flujo y velocidad variable del aire. Si la superficie plana de las palas es perpendicular al flujo de aire, la turbina no gira, en su defecto si las palas son paralelas al flujo de aire y permite al aire fluir a través sin problemas, no existe caída de presión en la turbina por lo tanto tampoco existe movimiento de las palas [3].

1.4 Análisis del Ciclo Termodinámico

Para el siguiente análisis se considera el ciclo ideal desarrollado en [4], en donde se considera que todos los componentes y procesos no presentan pérdidas. En la Figura 2 se presenta el ciclo ideal de acuerdo a las referencias de la Figura 1.

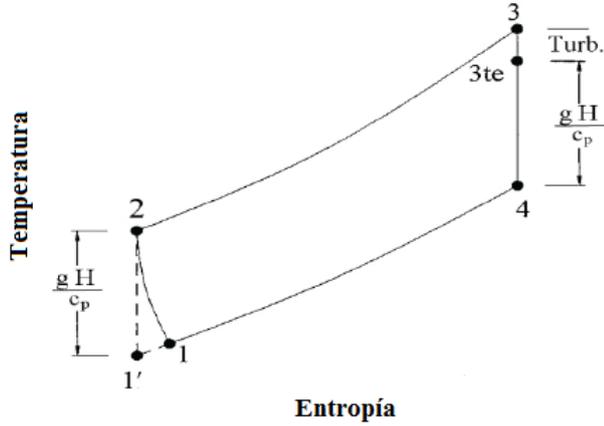


Figura 2. Ciclo Termodinámico de la SCPP [4]

La eficiencia de la planta se define por medio de la relación entre la potencia de salida y la energía solar disponible

$$\eta = \frac{P_{out}}{\dot{Q}}, \quad (1)$$

en donde la potencia solar disponible es

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_3 - T_2) = \dot{m}c_p\Delta T_{23}. \quad (2)$$

Parte de la energía en el proceso de expansión es utilizada para que el aire fluya ascendentemente en la chimenea (3te-4):

$$P_{3-4} = \dot{m}c_p(T_3 - T_4), \quad (3)$$

$$P_{3te-4} = \dot{m}c_p(T_{3te} - T_4) = \dot{m}\Delta h = \dot{m}gH_c, \quad (4)$$

considerando un gradiente adiabático

$$-\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_p}, \quad (5)$$

la variación de la entalpía en el proceso 3te-4 es el mismo que en el proceso 1'-2

$$\Delta h = gH_c = c_p(T_2 - T_1'), \quad (6)$$

de lo cual se puede obtener la potencia de salida

$$P_{out} = \dot{m}c_p(T_3 - T_4) - \dot{m}c_p(T_2 - T_1'). \quad (7)$$

Al definir una constante $c = T_2/T_1' = T_3/T_4$, y al sustituir las ecuaciones 2, 6, 7 en 1 se obtiene la eficiencia ideal de la planta.

$$\eta_c = 1 - \frac{1}{c} = \frac{gH_c}{c_p T_2}. \quad (8)$$

1.5 Principio Físico de la SCPP

Con el objetivo de comprender las interrelaciones de la planta, se presenta a continuación las dependencias fundamentales y la influencia de los parámetros esenciales para calcular la potencia generada de acuerdo a Schlaich [3].

El rendimiento general de la planta se define como el producto de los rendimientos individuales de los componentes de la SCPP

$$\eta = \eta_{coll} \cdot \eta_c \cdot \eta_{wt}, \quad (9)$$

donde η_{coll} es el rendimiento del colector, es decir la efectividad con la cual la irradiancia solar es convertida en energía térmica. η_c es el rendimiento de la chimenea y describe la efectividad con la cual la cantidad de energía térmica entregada por el colector es convertida en energía cinética. η_{wt} representa el rendimiento de las turbinas de viento.

El rendimiento del colector puede ser definido como la relación entre el flujo de energía térmica de salida del colector como aire caliente \dot{Q} y la irradiancia solar G que incide sobre la superficie del colector A_{coll} ,

$$\eta_{coll} = \frac{\dot{Q}}{A_{coll} \cdot G}, \quad (10)$$

donde el flujo de energía térmica en estado estable puede ser expresado como el producto del flujo de masa \dot{m} , el calor específico c_p y la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del colector

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad (11)$$

donde

$$\dot{m} = \rho_{coll} \cdot v_c \cdot A_c, \quad (12)$$

ρ_{coll} : densidad del aire a temperatura $T_2 + \Delta T$ en la salida del colector o entrada de la chimenea,

$v_{coll} = v_c$: velocidad del aire a la salida del colector o entrada de la chimenea,

A_c : sección transversal de la chimenea,

de lo cual se deduce el rendimiento del colector

$$\eta_{coll} = \frac{\rho_{coll} \cdot v_c \cdot A_c \cdot c_p \cdot \Delta T}{A_{coll} \cdot G}. \quad (13)$$

Además, de acuerdo al balance térmico en el colector

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A_{coll} \cdot G - \beta \cdot \Delta T \cdot A_{coll} \quad (14)$$

α : representa el coeficiente de absorción efectiva del colector. β es un valor de corrección de pérdidas, teniendo en cuenta las emisiones y las pérdidas por convección.

Por lo tanto el rendimiento del colector puede también ser expresado como

$$\eta_{coll} = \alpha - \frac{\beta - \Delta T}{G}. \quad (15)$$

Finalmente se deduce una expresión de la velocidad de salida del colector v_{coll} en función de la variación de temperatura ΔT

$$v_{coll} = \frac{\alpha \cdot A_{coll} \cdot G - \beta \cdot \Delta T \cdot A_{coll}}{\rho_{coll} \cdot A_c \cdot c_p \cdot \Delta T}, \quad (16)$$

esta ecuación de balance es independiente de la altura del colector debido a que se desprecian tanto las pérdidas por fricción y el almacenamiento de energía térmica en el suelo.

La chimenea convierte el flujo de energía térmica producida en el colector en energía cinética y potencial (caída de presión en la turbina). La ligera columna de aire de la chimenea se encuentra conectada con la atmósfera interna del colector y la cima de la chimenea, de tal manera que se produce una succión debido a la diferencia de presiones entre la base y la cima de la chimenea

$$\Delta p_{tot} = g \int_0^{H_c} (\rho_e - \rho_c) dH, \quad (17)$$

donde

g : aceleración de la gravedad,

H_c : altura de la chimenea,

ρ_e : densidad del aire del ambiente,

ρ_c : densidad del aire en la chimenea,

Δp_{tot} aumenta con la altura de la chimenea y se puede dividir en una componente estática y dinámica, despreciando las pérdidas por fricción

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_s + \Delta p_d. \quad (18)$$

A partir de lo anterior, la potencia debido al flujo resultante en la SCPP se define como

$$P_{tot} = \Delta p_{tot} \cdot v_c \cdot A_c, \quad (19)$$

y el rendimiento de la chimenea

$$\eta_c = \frac{P_{tot}}{\dot{Q}}, \quad (20)$$

finalmente se deduce

$$\Delta p_{tot} = \rho_{coll} \cdot g \cdot H_c \cdot \frac{\Delta T}{T_2}, \quad (21)$$

de acuerdo a la ecuación 21 se puede mencionar que la SCPP es análoga a una hidroeléctrica, en donde el gradiente de presión está dado por

$$\Delta p = \rho_{H_2O} \cdot g \cdot H, \quad (22)$$

por tal motivo la SCPP es llamada la Hidroeléctrica del Desierto.

Los aerogeneradores colocados en la base de la chimenea convierten el flujo de aire en energía rotacional. La caída de presión Δp_s en la turbina puede ser expresada de acuerdo a la ecuación de Bernoulli como

$$\Delta p_s = \Delta p_{tot} - \frac{1}{2} \rho_c \cdot v_c^2, \quad (23)$$

que también puede ser interpretada a partir de la ecuación 18. En consecuencia, la potencia útil P_{wt} en la turbina es

$$P_{wt} = v_c \cdot A_c \cdot \Delta p_s, \quad (24)$$

de forma análoga con la potencia eléctrica $P_e = E \cdot I$, el caudal $\dot{V} = v_c \cdot A_c$ corresponde a la intensidad de corriente I y el gradiente de presión Δp_s a la diferencia de potencial E .

2. MODELO FÍSICO

2.1 Diseño en base a R_d

En una SCPP existen dos tipos de disposición de las turbinas de acuerdo a la ubicación de su eje con respecto al suelo. El primero consiste en un arreglo de turbinas alrededor de la parte externa de la base de la chimenea con eje paralelo al plano horizontal, es decir el suelo. La segunda disposición hace referencia a una o conjunto de turbinas en la parte interna de la base de la chimenea con eje perpendicular al suelo, como se muestra en la Figura 3.

Para objeto del estudio presentado en este documento se considera lo expuesto por Fluri [6], quien menciona que

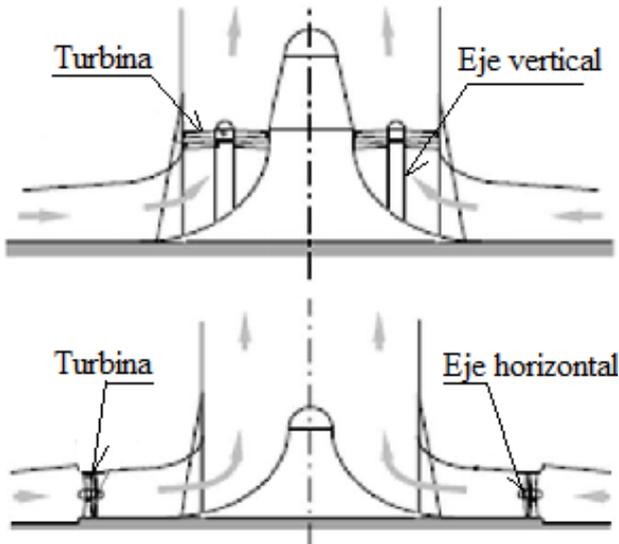


Figura 3. Ubicación de las Turbinas en una SCPP [5]

la relación entre la suma de áreas transversales donde se ubican las turbinas y el área transversal de la chimenea, determina la cantidad de flujo de aire en la SCPP

$$R_d = \frac{\text{Área transversal total del conjunto de turbinas}}{\text{Área transversal de la Chimenea}}, \quad (25)$$

en consecuencia, esta relación tiene mayor margen de variación al utilizar la configuración de turbinas con eje horizontal.

Para un nivel dado de irradiancia, se asume que el flujo másico no depende de las condiciones ambientales y es constante, a menos que se produzca una restricción al paso del aire. Esta restricción la generan las turbinas al ocupar un espacio en la base de la chimenea. Por el hecho de realizar un control de paso de pala, las turbinas



Figura 4. SCPP de estudio.

actúan como un mecanismo de sección variable, similar al cierre o apertura de una válvula que en este caso permite o no el paso del flujo de aire.

Al disminuir la sección variable el tiempo de residencia del aire en el colector se prolonga lo que aumenta la elevación de la temperatura del aire mientras fluye a través del colector; en consecuencia incrementa el efecto de flotabilidad y el almacenamiento térmico en el suelo, mejorando el desempeño de la planta durante la noche, no obstante se producen mayores pérdidas por convección y emisiones infrarrojas en el colector.

Para simular el efecto del control de paso de pala de las turbinas, se plantea utilizar las mismas condiciones ambientales en diferentes modelos cuya única diferencia es la sección transversal donde se ubican las turbinas; de esta manera se consigue diferentes cantidades de flujo másico al permitir o no el paso del aire.

Tabla 1. Dimensiones de la SCPP de análisis

Radio del colector	180 m
Altura externa del colector	1 m
Altura interna del colector	2.5 m
Diámetro de la Chimenea	9.6 m
Altura de la Chimenea	100 m

En este estudio se utiliza una planta con dimensiones similares a la construida en Manzanares, España, entre 1982 y 1983, con la modificación de disminuir la altura de la chimenea y compensando este cambio mediante la ampliación del área del colector. En la Tabla 1 se detallan las dimensiones tomadas para el diseño de la SCPP en Inventor, como se muestra en la Figura 4.

Tabla 2. Relación de Áreas R_d

Radio Chimenea [m]	Radio Turbina [m ²]	Área Chimenea [m ²]	Área Turbina [m ²]	R_d
4,8	0,25	72,38	0,20	0,1
4,8	0,36	72,38	0,40	0,2
4,8	0,44	72,38	0,60	0,3
4,8	0,51	72,38	0,80	0,4
4,8	0,57	72,38	1,01	0,5
4,8	0,62	72,38	1,21	0,6
4,8	0,67	72,38	1,41	0,7
4,8	0,72	72,38	1,61	0,8
4,8	0,76	72,38	1,81	0,9
4,8	0,80	72,38	2,01	1,0
4,8	0,84	72,38	2,21	1,1

Se escoge un diámetro de chimenea y una altura interna del colector que proporcione un amplio rango de R_d . En

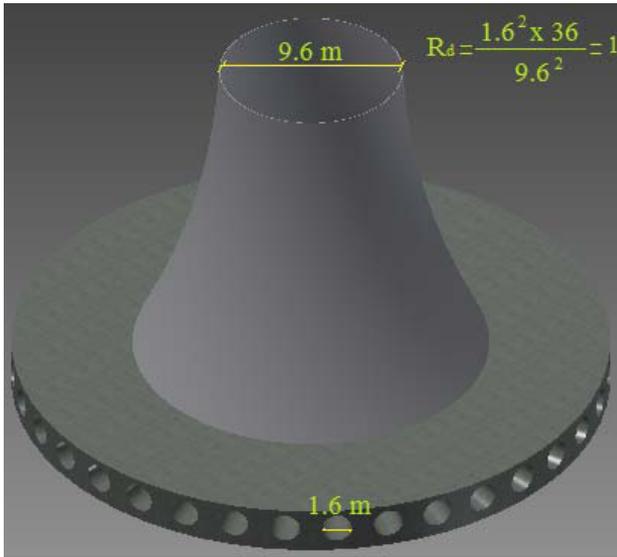


Figura 5. Disposición de turbinas y cálculo de la relación Rd

la Figura 5 se representa la disposición de las turbinas y un ejemplo de cálculo de la relación R_d . En la Tabla 2 se resumen los valores de R_d utilizados en este análisis.

2.2 Condiciones de Frontera

Para establecer las condiciones de frontera, se analiza el desempeño de la planta en estado estable bajo diferentes niveles de irradiancia. Considerando como base del análisis a la SCPP de Manzanares, se toman los valores de algunas constantes utilizados en ella. Estos valores son detallados en la Tabla 3.

Tabla 3. Constantes Utilizadas

β	6 W/m ² K
α	0.75
η_{coll}	0.62

Los niveles de irradiancia y temperatura ambiente son obtenidos de la base de datos del Sistema de Información Geográfica Fotovoltaica PVGIS, tomando como punto de análisis el sector de Manzanares durante el mes de Julio en el horario de 8h00 a 12h00. Utilizando estos datos y con ayuda de las ecuaciones de la sección 1.4 se determina la irradiancia absorbida y el incremento de temperatura ΔT en el colector, los resultados se aprecian en la Tabla 4 en donde G y T_2 representan los datos del PVGIS.

El diseño de esta planta, realizada en Inventor, pasa a ser evaluada por medio de una herramienta computacional

de elementos finitos CFXDesign de Autodesk, bajo las condiciones de frontera expresadas por Roozbeh [7] y considerando los resultados de la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados a diferentes niveles de Irradiancia

G [W/m ²]	Q [W/m ²]	ΔT [°C]	T_2 [°C]	T_3 [°C]
1.000	620	21,7	30,5	52,2
909	564	19,7	28,6	48,3
805	499	17,4	27,3	44,7
718	445	15,6	26,4	42,0
618	383	13,4	25,4	38,8
510	316	11,1	24,5	35,6

La pared de la chimenea se considera adiabática. La presión barométrica estática de la entrada del colector es la presión sobre la superficie terrestre, mientras que la presión de la salida de la chimenea es aquella correspondiente a 100 [m] de altura la cual se obtiene mediante la ecuación 26. Las condiciones se enumeran en la Tabla 5.

$$P_a = e^{-h/9731.4} \quad (26)$$

Tabla 5. Condiciones de Frontera

Sector	Variable	Función
Superficie del Suelo	Temperatura	$T = f(r) \text{ } ^\circ\text{C}$
Pared de la Chimenea	Calor	$Q = 0 \text{ W/m}^2$
Entrada del Colector	Presión	$P_s = 0 \text{ } P_a$
Salida de la Chimenea	Presión	$P_s = -1154 \text{ } P_a$



Figura 6. Sección de planta que abarca una turbina, vista lateral

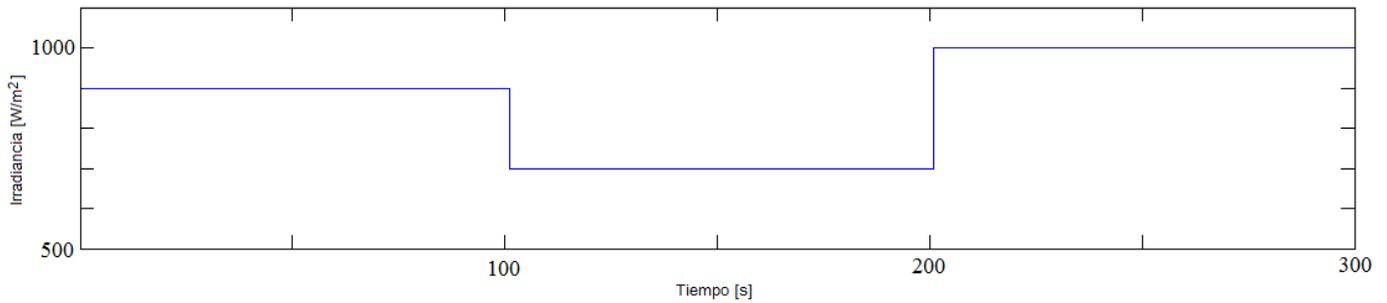


Figura 7. Irradiancia como entrada paso

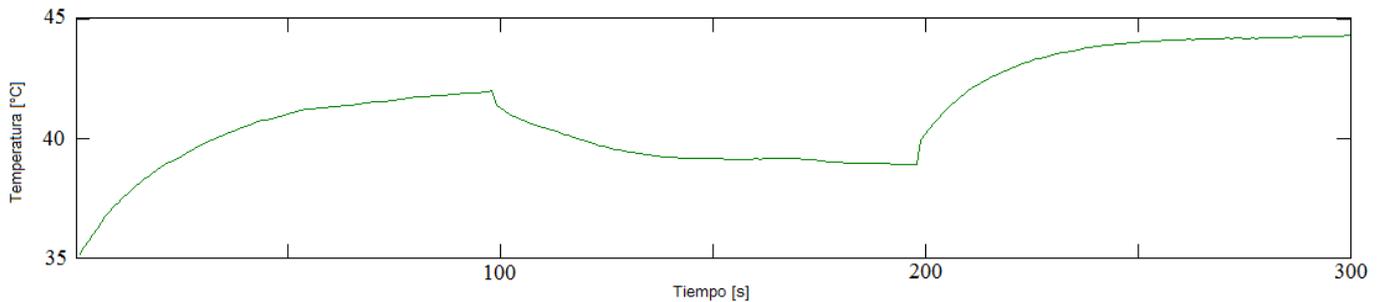


Figura 8. Temperatura media del aire dentro del colector

Para satisfacer la condición de $T = f(r)$ se discretiza la superficie del suelo en 9 partes, similar al estudio planteado por Hamdan [8], cada una de ellas con una temperatura que aumenta desde la entrada del colector hasta la entrada de la chimenea. Los valores de temperatura de cada parte de superficie de suelo dependerá de la irradiancia incidente que se encuentra entre 500 a 1000 W/m^2 .

El uso de la relación R_d tiene como propósito determinar el punto de máxima potencia. El flujo de masa de aire varía de forma ascendente cuando lo hace de la misma forma la relación R_d , manteniendo en este estudio el área transversal de la chimenea constante y el de las turbinas variable.

Cabe mencionar que la planta es un sistema totalmente simétrico, por ende se considera la sección de planta que abarca una turbina, como se muestra en la Figura 6, en donde la sección de transición representa la salida del colector o entrada de la chimenea y lugar de ubicación de la turbina es decir la sección variable.

2.3 Estado Transitorio

Para determinar el modelo dinámico de la planta se utiliza el análisis transitorio con el método de elementos finitos que brinda CFDesign.

Partiendo del resultado en estado estable, a cada nivel de irradiancia le corresponde un nivel de temperatura en la superficie del suelo dentro del colector, considerando sus nueve divisiones de acuerdo a la función $T = f(r)$. Para realizar el estudio en estado transitorio se expone a la planta a tres entradas paso de irradiancia, lo cual implica tres niveles de temperatura en la superficie del suelo dentro del colector.

En condiciones iniciales la planta se encuentra expuesta a 500 W/m^2 , luego se introducen los tres niveles de irradiancia diferentes con una duración de 100 s cada una como se muestra en la Figura 7. A continuación se registra la temperatura media del aire dentro del colector como variable de salida, con un periodo de muestreo de 1 s como se observa en la Figura 8. Este procedimiento se realiza para los once valores de R_d de la Tabla 2. Los datos obtenidos son procesados en la herramienta de identificación de MatLab para conseguir el modelo dinámico del sistema, es decir la función de transferencia que define a la SCP. En este caso la entrada del sistema es la irradiancia que incide sobre el colector y la salida la temperatura media dentro del colector.

El objetivo del control es encontrar una relación de áreas R_d , para que a cierto nivel de irradiancia la temperatura media del colector alcance una temperatura media de referencia, y así garantizar una velocidad de viento con la cual se consiga la máxima potencia.

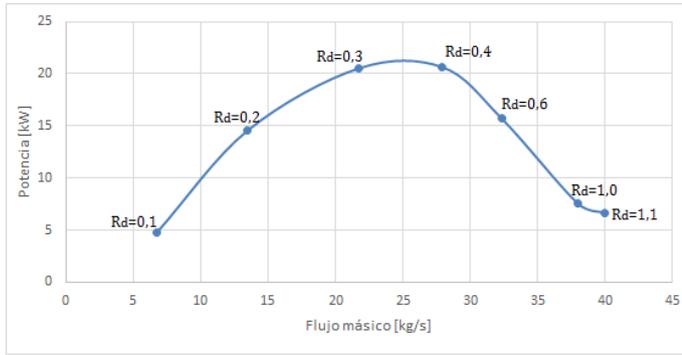


Figura 9. $P = f(\dot{m})$, para $500 \text{ [W/m}^2\text{]}$

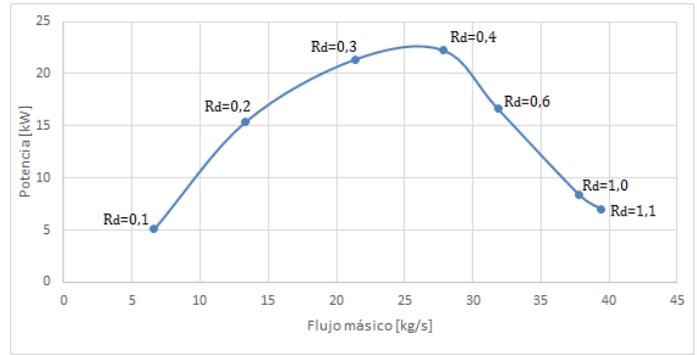


Figura 11. $P = f(\dot{m})$, para $900 \text{ [W/m}^2\text{]}$

3. RESULTADOS

3.1 Punto de Máxima Potencia

Para encontrar el punto de máxima potencia se toma como referencia lo realizado por Li [9], quien determina la potencia disponible del aire en la SCPP en función del flujo másico.

En este estudio, para replicar lo expuesto por Li se considera la relación de áreas R_d como una válvula que controla el flujo másico de aire. Bajo las mismas condiciones de frontera se analiza el desempeño de la SCPP en estado estable para varios valores de R_d , en otras palabras, al modificar la relación R_d a una cierta hora del día con un nivel de irradiancia determinado se obtiene diferentes valores de potencia, ya que el flujo másico del aire varía con respecto a la temperatura media del aire dentro del colector.

En las Figuras 9, 10, 11 y 12 se presentan los resultados por turbina de la potencia en función del flujo másico para cuatro niveles de irradiancia, cuando se modifica la relación de áreas R_d .

La potencia máxima se encuentra en general entre el rango de 0,3 a 0,4 de R_d para un nivel de irradiancia de 500 a

1000 W/m^2 , lo cual implica que las palas en esta configuración de SCPP deben mantener una posición dentro de este rango. Esto proporciona la primera consideración de control de la planta.

3.2 Modelo Dinámico

En el análisis de la respuesta transitoria de la planta, se utilizan aquellos datos en el rango de 0,3 y 0,4 de R_d para encontrar la función de transferencia $F(s)$ de la SCPP.

Para escoger la $F(s)$ se considera que la planta responde de acuerdo a las características de un sistema térmico, por ende su respuesta es lenta, la cual se encuentra en el orden de los minutos.

Además, en el análisis de estado estable para una SCPP con un $R_d = 0,4$ y un nivel de irradiancia de 1000 W/m^2 , la temperatura media del aire en el colector óptima es de $47.47 \text{ }^\circ\text{C}$. Haciendo uso de estos datos se consigue determinar la función de transferencia

$$F(s) = \frac{0.0006055}{s + 0.0124} \quad (27)$$

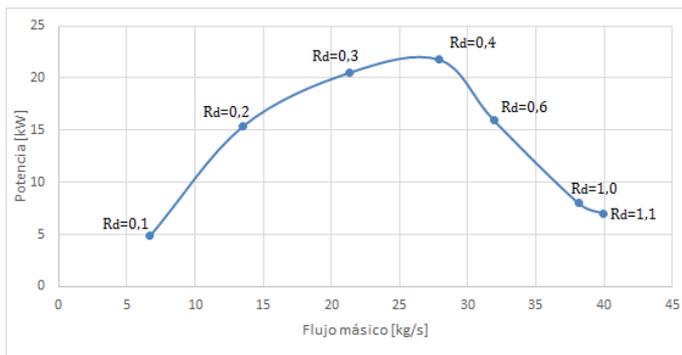


Figura 10. $P = f(\dot{m})$, para $700 \text{ [W/m}^2\text{]}$

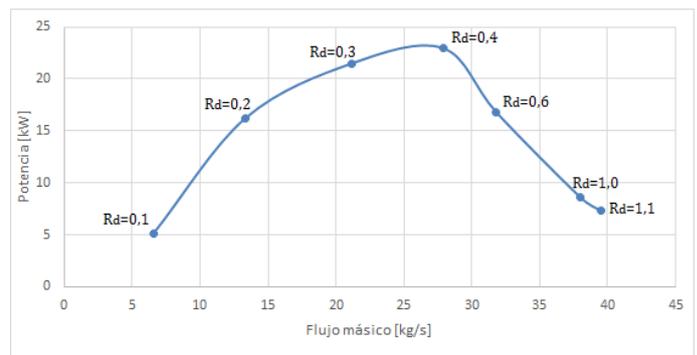


Figura 12. $P = f(\dot{m})$, para $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$

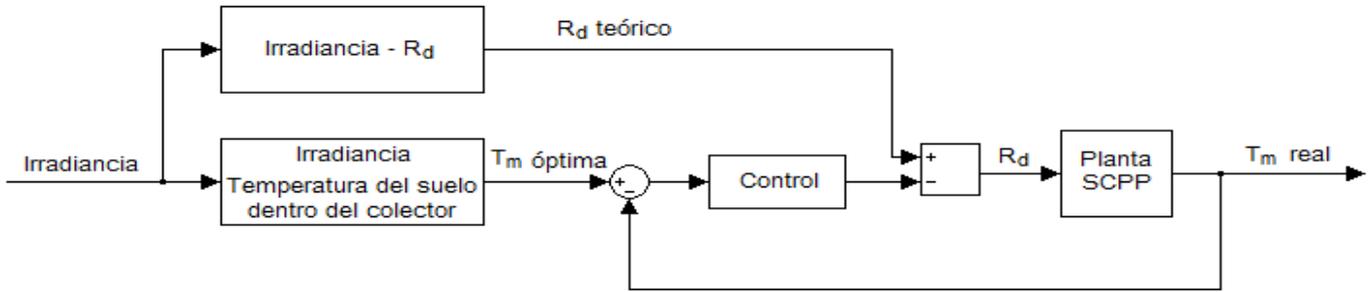


Figura 13. Control en lazo cerrado de la SCPP

En conclusión se determina que para un nivel de irradiancia de 1000 W/m^2 y un $R_d = 0,4$ se consigue el punto de máxima potencia, no obstante para niveles inferiores de irradiancia se necesita una relación R_d menor para incrementar la temperatura media del aire en el colector y finalmente conseguir el punto de máxima potencia.

4. ANÁLISIS DE CONTROL

En la Tabla 6 se resumen los resultados para los cuales la SCPP objeto de este estudio trabaja en el punto de máxima potencia.

Tabla 6. Valores Óptimos de Trabajo

Irradiancia [W/m^2]	Relación de Áreas R_d	Temperatura media en el Colector [$^{\circ}\text{C}$]
500	0,35	33,46
700	0,37	39,07
900	0,38	43,83
1000	0,40	47,47

En la Figura 13 se presenta el esquema del sistema de control, en donde la irradiancia pasa a ser evaluada por dos bloques. El primero proporciona un valor de la relación R_d teórico para la cual la SCPP debe alcanzar la máxima potencia, y el segundo indica al sistema la temperatura media óptima del aire en el colector. Este valor de temperatura es comparado con la temperatura real, y el error resultante es procesado por un controlador. Si la temperatura de salida es menor a la de consigna, el sistema de control provoca una reducción del valor de la relación R_d ; de esta manera el tiempo de permanencia del aire en el colector aumenta y con ello su temperatura; de esta manera aumenta la diferencia de presiones y en consecuencia la velocidad del viento.

5. CONCLUSIONES

Se ha conseguido una breve apreciación del modo y principio de funcionamiento de una SCPP, con lo cual se propone ciertos criterios simples a considerar a la hora del diseño de este tipo de planta, como lo es la relación de áreas R_d . Además se ha planteado un método de control que garantice el funcionamiento de la planta en el punto de máxima potencia expuesta por Li [9].

Se demostró que la sección variable no solo sirve para controlar el flujo del aire, sino para aumentar la temperatura del mismo. En una planta real este aumento de temperatura también se produce en el suelo, y de esta manera se almacena energía térmica que es aprovechada en horario nocturno; sin embargo también se generan pérdidas desde el colector por emisiones infrarrojas.

Para este particular caso, las palas de las turbinas deben ocupar un espacio en el área transversal al paso del flujo másico dentro del rango $0.3 \leq R_d \leq 0.4$. Cabe resaltar que este resultado no es general y un estudio similar debe realizarse para cada tipo de SCPP con dimensiones diferentes, es decir, las dimensiones de las palas, el espacio de la transición colector-chimenea y el diámetro de la chimenea se encuentran relacionados.

Por disponibilidad se utilizaron datos ambientales de verano de Manzanares - España, no obstante este tipo de planta trabajaría en óptimas condiciones en sectores del planeta con niveles de radiación poco variables entre los días del año, es decir sobre o cercanas a la línea ecuatorial.

En un estudio posterior los resultados adquiridos en este análisis deben ser comparados con un desarrollo práctico, en donde se cuente con turbinas y una planta real de dimensiones de laboratorio, sin olvidar el criterio de diseño que corresponde la relación R_d .

Uno de los inconvenientes de la SCPP es su baja eficiencia, es por eso que varios estudios se han realizado para

mejorar su desempeño o explotar los límites de funcionamiento. La mejora de los materiales, configuraciones y dimensiones de la planta, sistemas de almacenamiento de energía térmica y de control se han considerado en estudios realizados por diferentes universidades y centro de investigaciones del mundo.

REFERENCIAS

- [1] T.P. Fluri, J.P. Pretorius. Cost analysis of solar chimney power plants. *Solar Energy*, 83(2):246 – 256, 2009.
- [2] M. A. Dos Santos Bernardes. Solar chimney power plants – developments and advancements. *Solar Energy*, pages 172 – 186, 2010.
- [3] Schlaich Jorg. *The Solar Chimney. Electricity from the Sun*. Axel Menges, 1995.
- [4] A. Cervone, D. Zaccagnini Romito, E. Santini. Design of solar chimney power plant for mediterranean countries. *SClean Electrical Power*, pages 480 – 484, 2011.
- [5] T.P. Fluri, T.W. Von BackstrÄPm. Performance analysis of the power conversion unit of a solar chimney power plant. *Solar Energy*, 82(11):999 – 1008, 2008.
- [6] Fluri Thomas Peter. *Turbine Layout for and Optimization of Solar Chimney Power Conversion Units*. University of Stellenbosch, 2008.
- [7] Roozbeh Sangi, Majid Amidpour, Behzad Hosseini-zadeh. Modeling and numerical simulation of solar chimney power plants. *Solar Energy*, 85(5):829 – 838, 2011.
- [8] Mohammad O Hamdan. Analysis of solar chimney power plant utilizing chimney discrete model. *Renewable Energy*, 56:50 – 54, 2013.
- [9] Jing-yin Li, Peng-hua Guo, Yuan Wang. Effects of collector radius and chimney height on power output of a solar chimney power plant with turbines. *Renewable Energy*, 47:21 – 28, 2012.