



II CAIM 2010
Segundo Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica
San Juan - Noviembre 2010

Modelización de torre convectiva solar basada en una variación conocida de la geometría de ingreso de la masa de aire

Soto, Walter, Martín, Héctor D., Aguirre, Ernesto D. ⁽¹⁾

Grupo de Diseño Mecánico - Facultad Regional Reconquista
Universidad Tecnológica Nacional
Parque Industrial Reconquista, Reconquista Santa Fe – Argentina
Tel/Fax: +54-3482420048 - E-mail: waltersoto2007@gmail.com

Resumen.

La torre de generación convectiva, también conocida como chimenea solar, es una planta de energía eléctrica dentro de la categoría de energías renovables, verdes o “ecológicas”. Consiste en un colector que almacena calor en una gran masa de aire y lo canaliza a través de un ducto principal vertical aprovechando la diferencia de temperatura y presión, entre la zona del colector y la zona de descarga a la atmósfera. De acuerdo a la bibliografía consultada, ésta es económicamente viable en potencias que superan los 100 MW, lo cual supone importantes inversiones y determinaciones específicas sobre su localización. Para el caso de potencias menores, el diseño tradicional es deficiente, siendo necesario reevaluar la física del fenómeno que interviene en el proceso de aceleración de la masa de aire y cambiar la forma del mismo. En este trabajo se presenta un estudio preliminar sobre la forma geométrica del colector y la altura del ducto central, destinado a proveer las velocidades necesarias para un aerogenerador de baja potencia que satisfaga la demanda de una pequeña comunidad.

Palabras Claves: Torre Convectiva, Ley de las Áreas, Solar Updraft, Manzanares, número de Mach.

1. INTRODUCCION

En la actualidad existe un gran interés en el estudio de un dispositivo conocido como Solar Updraft; el cual para generar energía eléctrica, utiliza el calor del sol para calentar una masa considerable de aire, el cual es canalizado hacia una chimenea, produciendo una corriente ascendente que mueve un aerogenerador en su seno. Tal dispositivo se conoce en la actualidad como Solar Updraft, chimenea solar, o también como torre convectiva.

Los principios en los que se fundamentan su funcionamiento, fueron expuestos hace mucho tiempo por un capitán del ejército español Isidoro Cabanyes [1] y rescatado por E. Lorenzo [2]. Sin embargo en la bibliografía hoy existente, se toma como referencia indiscutida a J. Schlaigh [9], [10], como el iniciador o propietario de la patente de la torre convectiva. En la Figura 1, se ve el esquema su geometría y principio de funcionamiento en términos generales.

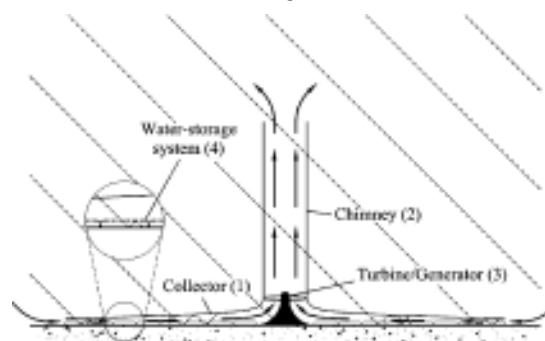


Figura 1 – Esquema general de las torres convectivas.

Las líneas de trazo indican los rayos del sol, los cuales inciden en una superficie de grandes dimensiones llamada colector. La función de ésta es calentar al aire “atrapado” en el colector, y canalizarlo hacia la chimenea central, en la cual una turbina eólica o aerogenerador convencional trasforma la energía de la vena de aire en energía eléctrica. Para aumentar la performance de este dispositivo, se ha estudiado y es comúnmente aceptado, el colocar depósitos de agua en el piso del colector, un sistema de depósitos de agua, cuya finalidad es capturar la energía térmica no disipada en la masa de aire durante las horas del día y posteriormente cederla durante las horas de la noche, según J. Schlaigh [9], [10].

A este dispositivo, con su geometría general y su principio de funcionamiento lo estudian la gran mayoría de investigadores en energía alternativas (Bernardes et alia [3]) que se mantuvieron en la línea de la mejora de la transferencia térmica y la eficiencia. Institutos, Universidades y centros de investigación que le han dedicado bastante tiempo para estudiar el problema de la transferencia de calor, la cual es crítica para mejorar las velocidades y el caudal de aire necesario que aumenten la potencia generada. Se puede afirmar que, el estudio de la performance lleva el mayor esfuerzo de investigación.

Sin embargo, dentro de la amplia bibliografía consultada, no se ha hallado aún hasta este trabajo, algún estudio sobre el cambio de las performances por variaciones geométricas, mejoradas por la convección y la transferencia de calor. Sólo se halló un trabajo de Papagergiou [7], sobre los cambios estructurales y geométricos de la chimenea, al plantear una chimenea flexible, para bajar los costos

constructivos y mejorar su eficiencia al incrementar el salto de presión, aumentando la altura de la misma, pero manteniendo el principio de un enorme colector. Hasta el momento sólo se ha realizado un prototipo a gran escala que demostró la factibilidad de esta idea para generar energía eléctrica, que fue la estación experimental de Manzanares, España. De acuerdo a las investigaciones realizadas hasta el momento, todas apuntan a una relación altura, diámetro de colector para relacionar la potencia generada por la misma, y poder prediseñar una de estas plantas generadoras de energía. Esto es muy costoso en términos constructivos, y las alturas necesarias para alcanzar un valor de potencia operativa que justifique su inversión, presentan problemas estructurales e inconvenientes derivados de las respuestas aeroelásticas que encarecen aún más la estructura. Tampoco se aprovecha eficientemente el salto de presión derivadas de la diferencia de altura entre el colector y el extremo superior de la chimenea.

En el presente trabajo se evalúa una alternativa de menores dimensiones de aquellas que son objeto de estudio en la actualidad. No se va a resolver el balance radiactivo en la incidencia sobre el colector sino que se realizará una aproximación burda, tomando directamente un valor de incremento de temperatura a la entrada del colector para cuantificar de alguna manera el aporte del calor por radiación solar. Esta simplificación se debe a que los valores necesarios para obtener un coeficiente de película deben ser experimentados en base a los materiales utilizados para la construcción del colector y la chimenea propiamente dicha.

En la Argentina, las demandas energéticas están asociadas a los vaivenes económicos de la industria nacional, el tipo de cambio que sea favorable para exportar a los mercados internacionales, de suyo que una planificación en materia energética es importante y fundamental dentro de un proyecto, pero la actualidad en economía política del país, hacen que este tipo de proyectos, no tengan viabilidad institucional ni productiva. A pesar de esto, el nuestro, es un país en el cual hay un gran número de comunidades sin acceso al sistema interconectado nacional, para ellas el costo de la instalación de una planta convencional de energía eléctrica, como de represas hidroeléctricas, no es factor de peso dentro de las políticas de desarrollo económico del país. Es necesario recurrir a otros sistemas alternativos para desarrollar en estas comunidad aisladas una central que permita abastecerlas de energía a un costo bajo.

2. Especificaciones Generales

Las especificaciones para el diseño de una torre convectiva que pueda ser de uso en una pequeña comunidad, principalmente que disponga de una gran irradiación solar, muy bajo régimen de vientos, bajo costo de mantenimiento y que sea accesible el grupo generador para su mantenimiento, son las especificaciones generales.

Se desprende que los materiales han de ser los más económicos y fáciles de acceder en el mercado local, por ello la simplicidad geométrica de la misma es determinante principalmente para desarrollar un programa de mantenimiento estructural con personal poco calificado que sea residente de la zona. La estructura no debe ser muy alta tampoco porque no se podrán trasladar grúas industriales ni sistemas de elevación que superen cierta altura, por ejemplo los 20 metros.

Por ello las condiciones generales para el diseño serán las siguientes:

- Baja altura y accesibilidad al generador (hasta 40 metros).
- Colectores de bajo diámetro.
- Materiales de buena conductividad térmica, manipulables con herramientas manuales, de bajo costo.
- Desarrollar altas velocidades con baja altura.
- Generadores de bajo diámetro.

Con estas especificaciones se ensayaron varios modelos de diferentes geometrías en la sección del conducto de la chimenea como de la pendiente del colector para generar un cambio de sección en el flujo de entrada. Se verificó en ellas los resultados previstos en los trabajos publicados hasta el momento y otros que se publican en este trabajo.

2.1. Generalidades Geométricas

Los modelos de las torres solares que se han estudiado hasta el momento, difieren muy poco en su geometría, aunque no hay un consenso generalizado de dónde colocar un grupo aerogenerador estándar o cuasi estándar para obtener la mayor potencia. Algunos de los modelos estudiados se muestran en la Figura 2

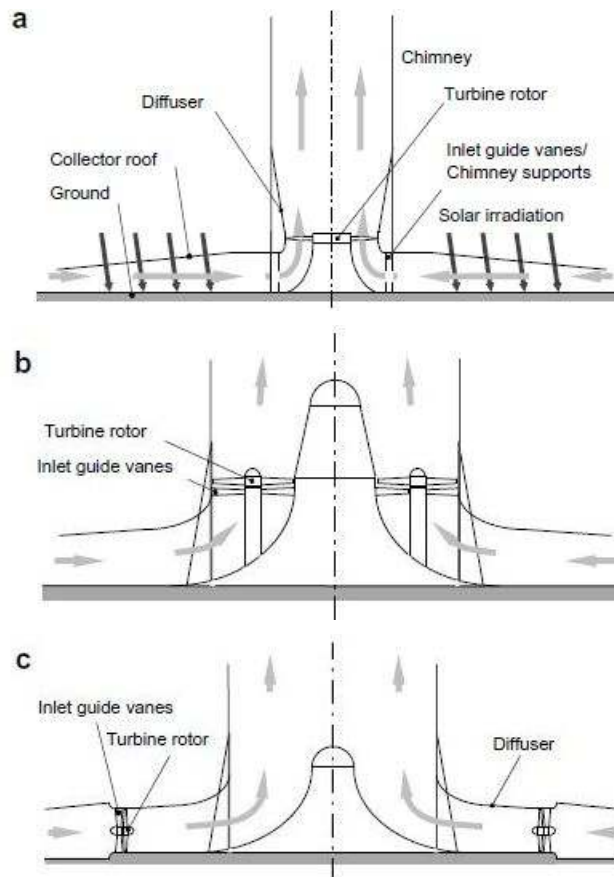


Figura 2 – Variaciones de posición del grupo de generación.

Tomando en cuenta los trabajos en los cuales se han presentado estas alternativas, la modelación parte directamente en que la masa de aire se mueve por la diferencia de temperatura, y la corriente

convectiva se modela termodinámicamente. Es decir, la geometría está diseñada para transferir toda la energía que es posible captar con el colector, y transformarla en velocidad para canalizar esta masa de aire en el aerogenerador. Los desarrollos se pueden ver en Onyango et alia [11].

Teniendo en cuenta esto, se optó por encarar en principio mejorar el caudal del aire aprovechando las condiciones del salto de presión entre la entrada y la salida. Esto implica también cambiar el principio de funcionamiento, es decir cambiar grandes masas de aire caliente, por un aumento del caudal de aire acelerado por diferencia de presión, al cual se le adiciona energía a través de transferencia de calor por convección a través de una superficie altamente conductora. Además la inclinación hacia arriba del colector, se ha pensado para que refleje parte del calor del sol hacia la chimenea central para mejorar la performance (J. Schlaigh, Onyango, Bernardes, etc.).

En principio se había iniciado el estudio intentando transferir la variación de aéreas que se utilizan en la conformación de un tubo venturi, a la geometría de una chimenea solar, principalmente cambiando la geometría del colector, su unión con la chimenea, y posteriormente la geometría de ésta última.

Si bien el desarrollo de un tubo venturi, tiene dimensiones normadas, con pérdidas calibradas o curva de pérdidas conocidas, sus variaciones geométricas no son fáciles de implementar. El otro problema con el cual se encontró en la etapa de modelado, es que el flujo de aire cambia su dirección casi en ángulo recto, una vez concentrado en el centro del colector y es canalizado hacia la chimenea.

Por ello se recurrió a una ecuación que relaciona el área mínima de caudal con la distribución del área en función de un parámetro adimensional. Esta es conocida como la Ley de las Áreas, y determina la distribución de las mismas a partir del valor del número de Mach (White [4]),

$$\frac{A}{A_{min}} = \frac{1}{M} \left(1 + \frac{(k-1)}{2} M^2 \right)^{\frac{k+1}{2}} \quad (1)$$

Siendo $k = 1.4$, el valor del coeficiente isoentrópico para el aire, esta ecuación se reduce a

$$\frac{A}{A_{min}} = \frac{1}{M} \left(\frac{5 + M^2}{6} \right)^3 \quad (2)$$

En las ecuaciones de flujo compresible, el área mínima es conocida como área de garganta, en la cual el valor del número de Mach es igual a 1, es decir se alcanza la velocidad del sonido. Para alcanzarla es necesaria como condición, que la relación entre la presión local y la presión de impacto tome el valor 0.52828. Como se trabaja lejos del rango compresible, este valor no se alcanza. Se generó en principio una primera geometría que se denominará en adelante torre modificada, la cual se muestra en la Figura 3.

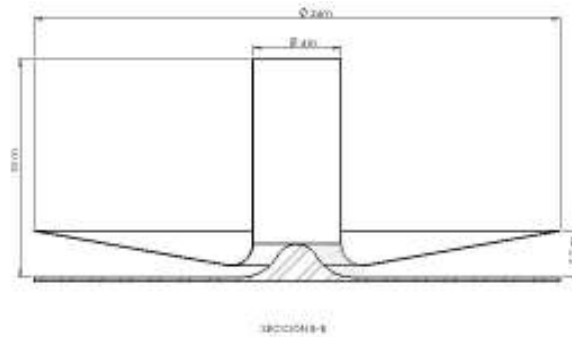


Figura 3 – Chimenea con transición de curvas elípticas.

Esta geometría conduce a formas constructivas complicadas, se buscó simplificarla para que ésta sea mucho más sencilla para construirla. Por ello se decidió usar formas curvas cerradas, evitando curvas elípticas y abiertas. La alternativa que se propuso se ve en al Figura 4,

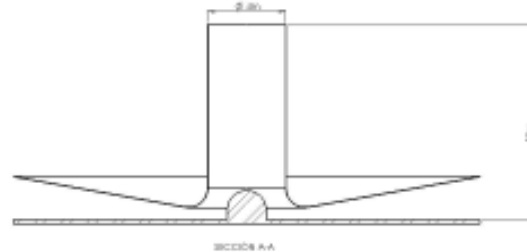


Figura 4 – Chimenea con transición de curvas simples.

A esta torre se la denominará en este trabajo simplemente torre, seguida del número que indica la altura de la chimenea. Posteriormente se reprodujeron otros análisis con modelos variando solamente la altura de la torre. Las alturas simuladas fueron 20, 30 y 50 metros.

Con esta geometría se buscó simplificar la tarea constructiva y que la misma sea de fácil mantenimiento por personal poco calificado.

2.2. Metodología empleada en la simulación

Se utilizó un programa de elementos finitos en pasos fraccionados, que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes, utilizando un modelo de turbulencia de Smagorinsky, por que se estiman desprendimientos en la zona de cambio de dirección, en el paso del colector a la chimenea, utilizando el programa desarrollado por el Dr. Carlos Sacco [6]. En la figura 5 se esquematiza el dominio de cálculo:

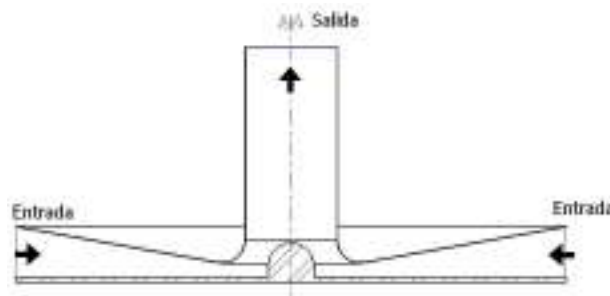


Figura 5 – Esquema de la región de análisis.

2.3. Condiciones de Contorno

Las condiciones de contorno son las siguientes:

$$\left. \begin{aligned} P_{entrada} &= 101325 [Pa] \\ T_{entrada} &= 303.16 [K] \end{aligned} \right\} \text{Condiciones de entrada}$$

$$\left. \begin{aligned} P_{salida} &= P_{entrada} - (\rho g H) [Pa] \\ T_{salida} &= 293.16 [K] \end{aligned} \right\} \text{Condiciones de salida}$$

De acuerdo a un valor de velocidad del viento nula y un salto térmico de 10 °C, el coeficiente de película h para la transferencia convectiva de calor, se puede tomar igual a 4 W/m² K, de acuerdo al trabajo de Bernardes, sin embargo para estas simulaciones se ha evitado calcular la transferencia por convección y se despreciaron los efectos del calor por radiación que pueda proyectar el colector sobre la torre. También, los valores del salto térmico de 10°C grados centígrados es un valor extremadamente conservativo, para los valores corrientes que se viven cotidianamente en las regiones que se encuentran en las zonas del norte del país, particularmente en el NEA y NOA.

3. Algunos resultados

Con las simulaciones realizadas se pudieron obtener los siguientes resultados.

3.1. Ley de las áreas

Comparación de la variación de la Ley de las áreas con el número de Mach

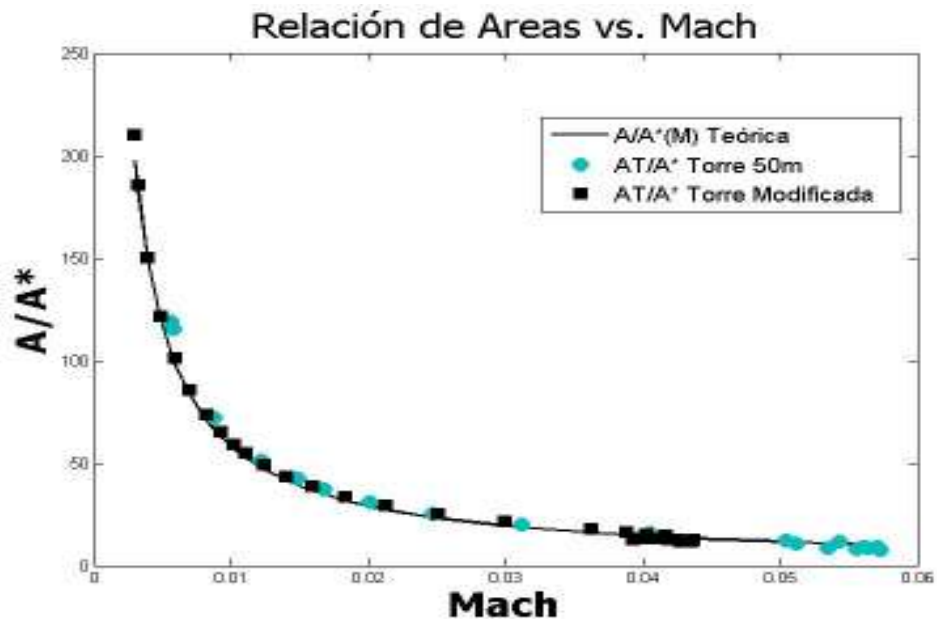


Figura 6 – Variación de las áreas con el N° de Mach.

Se aprecia un buen acuerdo entre la curva teórica de la distribución de las áreas con las geometrías propuestas. En este caso se utilizaron para comparar la torre de 50 metros de altura con la de 10 metros modificada.

3.2. Curvas de trayectorias baricéntricas

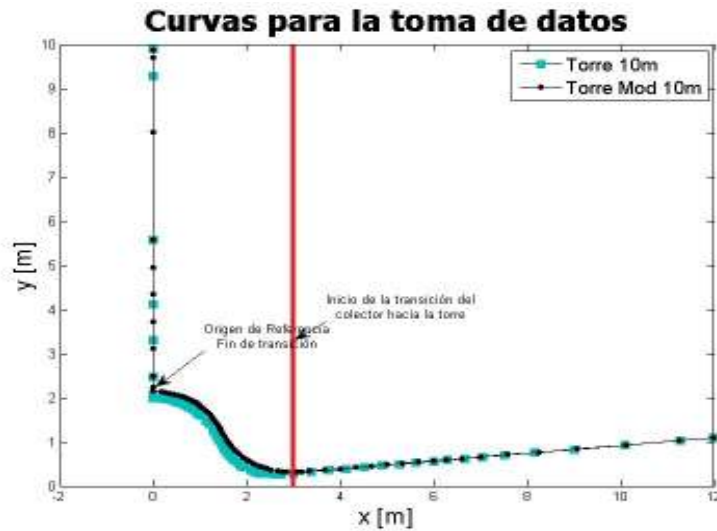


Figura 7 – Distribución de los puntos sobre la curva que une los baricentros de sección.

En esta figura se comparan las diferentes curvas que se utilizaron para la toma de los datos en las secciones transversales de la torre, desde el ingreso del flujo hacia la salida. Las mismas pasan por el baricentro de la sección proyectada bidimensional, la trayectoria del flujo es desde la derecha hacia la izquierda, y luego en la transición hacia arriba, la sección de salida.

Se estimó que era más útil esta representación, para posteriormente realizar ajustes sobre las secciones para mejorar el desempeño de la torre. La torre modificada tiene curvas abiertas más complicadas, por lo que existe una pequeña diferencia entre los baricentros de las secciones con respecto a las otras más simples.

3.3. Distribución de la velocidad

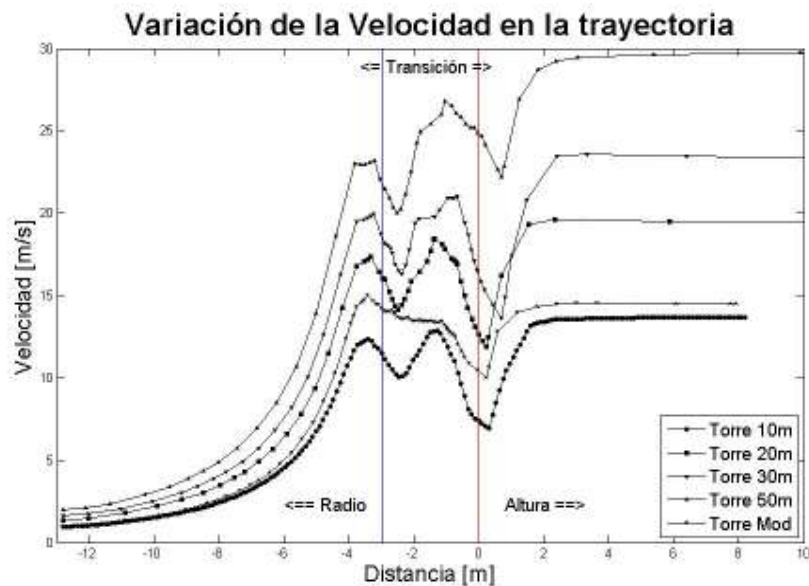


Figura 8 – Variación de la velocidad sobre la curva de baricentros.

En todos los casos se observa un aceleramiento rápido del flujo, pero por los problemas antes expuestos, se pierde en la sección de transición. Esto lleva a considerar dos posiciones en las cuales colocar el generador, antes de la transición o posterior a ella. Tomando en cuenta los datos recabados por estas simulaciones, una altura conveniente para colocar el grupo generador está alrededor de los 4 metros dentro del conducto de la torre.

3.4. Distribución de presión

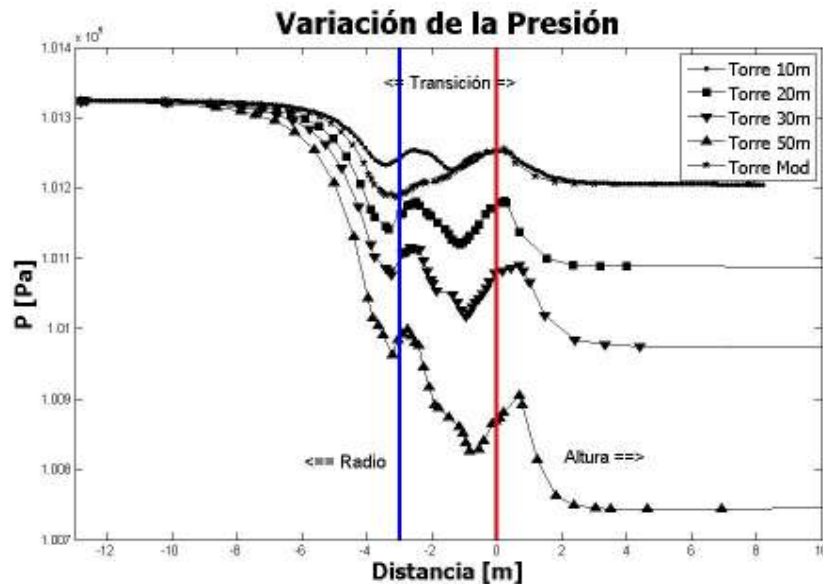


Figura 9 – Variación de la presión sobre la curva de baricentros.

La distribución de la presión en los distintos modelos, sugiere que se debe modificar la geometría en la zona de la transición ya que al aumentar la altura, las variaciones en la zona de transición se vuelven muy bruscas. Por ello, el diseño de esta zona debe estar ligado al salto de la presión en principio.

3.5. Variación del número de Mach

En congruencia con los valores de la distribución de la presión, ésta es la segunda variable de diseño, con ella se puede afinar la geometría obtenida por las gráficas de la presión.

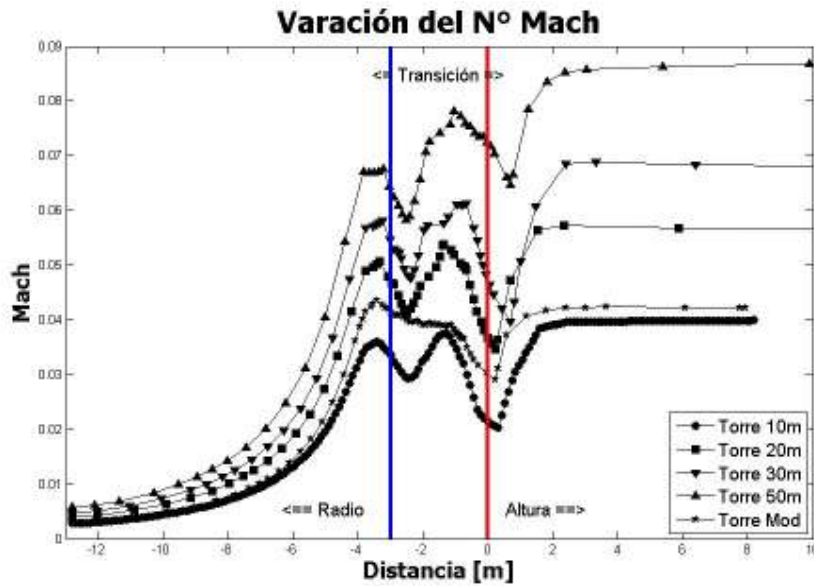


Figura 10 – Variación del N° de Mach sobre la curva de baricentros.

3.6. Comparación entre la torre de 10 metros con la torre de 10 de canal modificado

En las Figuras 11, 12 y 13, se puede observar la mejora que produce una transición más suave, sin embargo conlleva una complejidad constructiva que aumenta el costo. En la evaluación de valores, con una geometría de transición suave, la torre modificada, se alcanza en la zona de empalme un aumento del orden del 17% al 21% con respecto al diseño más básico, la torre de 10 metros.

Las velocidades finales en conducto sólo mejoran en un 6%.

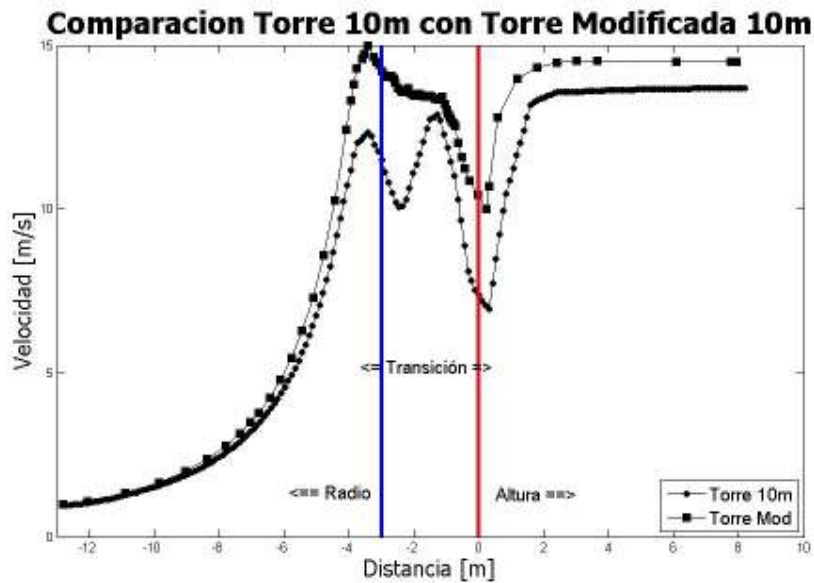


Figura 11 – Comparación de la distribución de velocidad sobre la curva de baricentros.

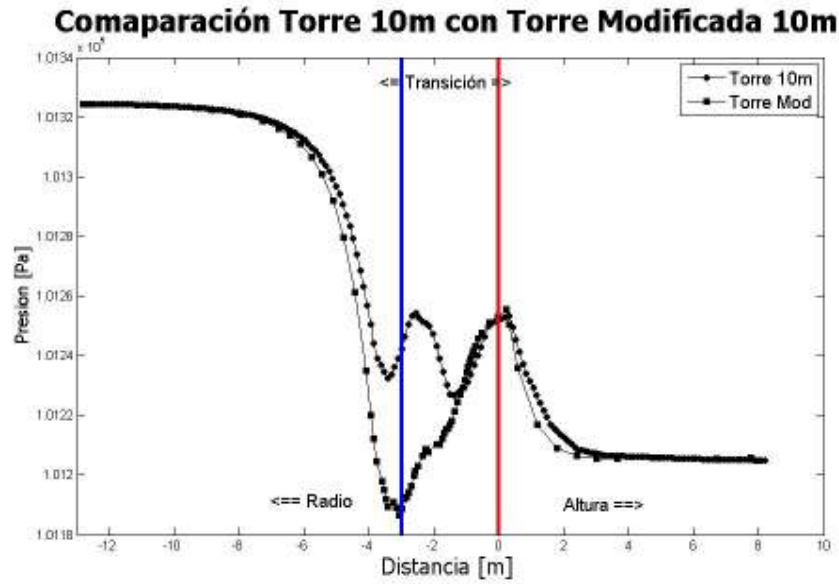


Figura 12 – Comparación de la distribución de presión sobre la curva de baricentros.

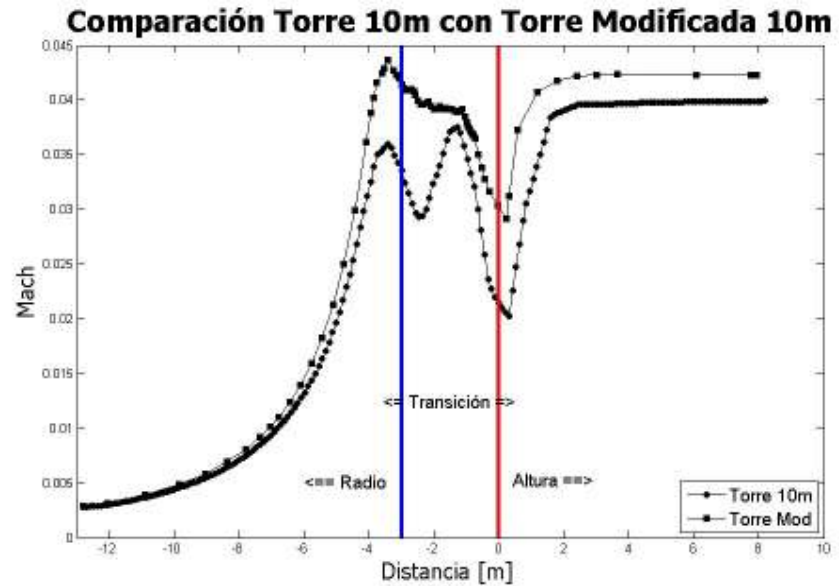


Figura 13 – Comparación de la distribución del N° de Mach sobre la curva de baricentros.

Esto implica una decisión constructiva, si el aerogenerador será colocado en el conducto de la chimenea, no conviene mucho aumentar la complejidad de la zona de empalme entre colector y chimenea. Aunque es evidente que la alternativa de colocar el grupo generador antes de la zona de empalme, es muy atractiva por los valores de velocidad que alcanza el flujo.

Se observa lo que se esperaba, que para un mismo salto de presión se puede extraer una mayor energía. Existe, sin embargo, un compromiso entre la variación de la geometría para alcanzar mayores velocidades, y la posibilidad de bloqueo por desprendimientos de vena fluida, fenómeno

conocido como sombra, bloqueo o interferencia aerodinámica. Para determinar estos límites, es necesario recurrir a un modelo experimental para determinarlos.

3.7. Curvas de Potencia

La ecuación de potencia eléctrica instantánea que se obtiene en la chimenea, de acuerdo a Onyango et alia y Erich Hau, Wind Turbines:

$$P_i = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho_m(h) \pi R^2 V^3 \right) \quad (3)$$

Luego, considerando la variación de la densidad con la altura, como función de la presión, para una atmósfera isotérmica, ya que en 100 metros, la variación de la temperatura es despreciable.

$$\rho_m(h) = \frac{P_{at} \left(1 - \frac{Bh}{T_0} \right)^{5.26}}{RT_0} \quad (4)$$

B es la pendiente del decrecimiento de la temperatura con la altura, igual a 0.0065 K por metro, y R la constante universal de los gases (White).

Con esta ecuación y la velocidad de conducto, se obtiene la gráfica de potencia que es posible extraer de la chimenea.

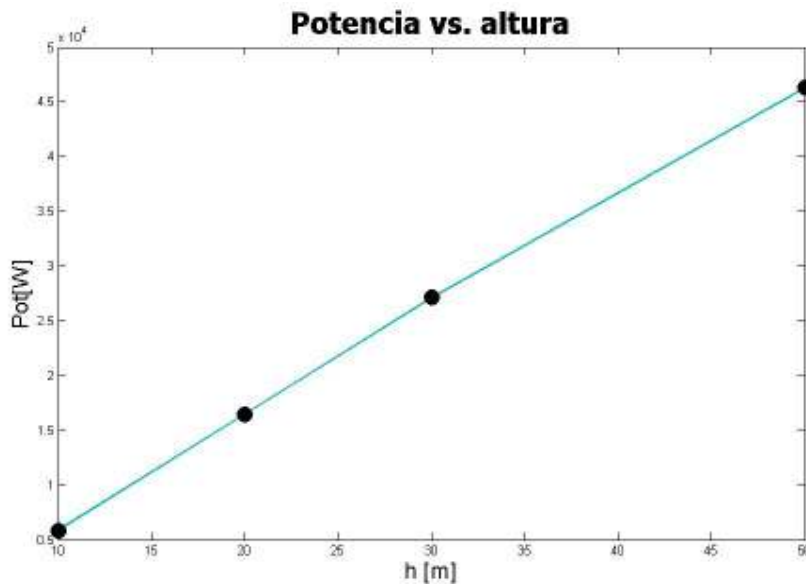


Figura 14 – Variación de la Potencia con la altura del conducto de la chimenea

Estos valores se han obtenido utilizando la velocidad alcanzada en el área de descarga en las simulaciones y posteriormente aplicando las fórmulas (3) y (4), para el cálculo de la potencia. En la Tabla 1 se resumen los valores graficados:

Tabla 1 – Valores de Potencia

Torre	Altura [m]	Velocidad [m/s]	Potencia [W]
10	10	13.7	11721.7
20	20	19.3	32876.2
30	30	22.8	54229.2
50	50	27.3	92631.3

4. Conclusiones

De acuerdo a los resultados presentados, se puede afirmar que el estudio de una mejor geometría para el colector puede contribuir a una mejora en las prestaciones y los cambios de las dimensiones en este tipo de dispositivos para generar energía eléctrica, con la consecuencia de una reducción de costos para su emplazamiento.

Quedan pendientes los ensayos experimentales para corroborar estos estudios. De suyo, aún en la geometría estándar, la que usó la torre de Manzanares, no existen datos de mediciones, a excepción de los presentados por J. Schlaigh. En general abundan datos obtenidos de modelos matemáticos, para contrastar con ellos.

En cambio, para esta nueva geometría quedan aún por realizarse varios pasos, desde la experimentación hasta el estudio de aporte de calor por radiación, del colector hacia la torre y los mecanismos de transferencia de calor, su incidencia en la performance y los modelos más adecuados de rotores y grupos generadores para esta geometría.

El campo se presenta prometedor y se espera pronto contar con nuevos resultados para su aplicación en la generación.

5. REFERENCIAS

- [1] Cabanyes, Isidoro, Proyecto de Motor Solar. La Energía Eléctrica. Revista general de Electricidad y sus aplicaciones. 1903.
- [2] Lorenzo, E., De los archivos históricos de la Energía Solar: de una propuesta de 1903 a la Central de Manzanares.
- [3] Santos Bernardes, M., Von Backström, T., Kröger, D. Analysis of some available heat transfer coefficients applicable to solar chimney power plant collectors. Solar Energy 2008.
- [4] White, Frank M., Fluid Mechanics. McGraw Hill, 4th Edition 2005.
- [5] Xiping Zhou, Jiakuan Yang, Bo Xiao, Guoxiang Hou, Fang Xing, Analysis of chimney height for solar chimney power plant. Applied Thermal Engineering 2009.
- [6] Sacco, C., Giuggioloni, F., González, E., Análisis de la aerodinámica de un automóvil. Anales MECOM 2005.
- [7] Papageorgiou, Christos D., Floating Solar Chimney versus concrete Solar Chimney power plant.
- [8] Hau, Erich, Wind Turbines. Fundamentals, Technologies, Application, Economics. 2nd Edition. Springer – Verlag, 2006.
- [9] Schlaigh, J, The Solar Chimney: Electricity from the Sun. Axel Menges Edition, 1995.

- [10] Schlaigh, J., Bergemann, R., Schiel, W., Weinrebe, G., Design of Commercial Solar Updraft Tower Systems – Utilization of Solar Convective Flows for power generation.
- [11] Onyango, F., Ochieng, R., The potential of solar chimney of application in rural areas of developing countries. Fuel First.