

Las torres de enfriamiento son esenciales en centrales termoeléctricas y nucleares para disipar calor. Su forma hiperbólica permite la refrigeración por tiro natural, aspirando aire frío y expulsando calor sin ventiladores, y además ofrece gran resistencia al viento. Por estos motivos y por los que vamos a profundizar, el modelo hiperbólico se ha popularizado mucho desde sus inicios en 1920 (Torre de Shújov), de tal manera que se pueden ver tanto en centrales capaces de resistir terremotos de alta magnitud como la de Kashiwazaki-Kariwa (Japón), como en rascacielos futuristas como la Torre de Cantón y la torre de Tokyo.

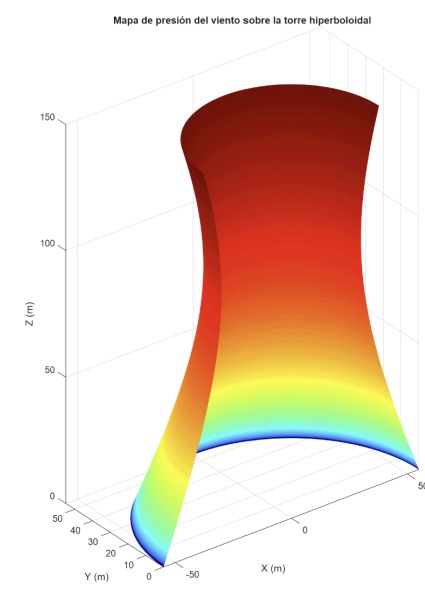
ANÁLISIS DE PRESIÓN DEL VIENTO

Campo de presiones

La presión del viento sobre la torre se caracteriza por la función:

$$P(z) = \left(\frac{1}{2}\right)\rho V(z)^2$$

el viento viene desde el noreste, por lo que únicamente afecta a una mitad expuesta de la torre.

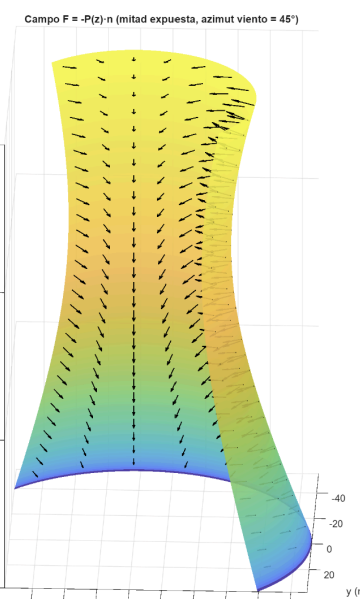


Efecto de el campo escalar de presiones y el campo vectorial de fuerzas sobre la torre

Campo de fuerzas

El campo de fuerzas es el siguiente:

$$F(x, y, z) = -P(z)\vec{n}$$



Fuerza total y por unidad de superficie

Para el cálculo de de la Fuerza total y fuerza por unidad de superficie se usará la siguiente formula:

$$F_{tot} = \iint_{S_{hip}} P(z) dS$$

Ademas de la parametrización de la hipérbola necesaria para obtener el radio en funcion de la altura;

$$\mathbf{r}(\theta, z) = (\rho(z) \cos \theta, \rho(z) \sin \theta, z)$$

realizamos la siguiente operacion para obtener dS:

$$dS = \|\mathbf{r}_\theta \times \mathbf{r}_z\| d\theta dz$$

Y finalmente la integral se define como:

$$F_{total} = \iint_{S_{media}} P(z) dS = \int_{z=0}^H \int_{\theta=-\pi/2}^{\pi/2} P(z) \rho(z) \sqrt{1 + \rho'(z)^2} d\theta dz$$

Y la superficie:

$$A_{media} = \iint_{S_{media}} dS = \int_0^H \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \rho(z) \sqrt{1 + \rho'(z)^2} d\theta dz = \pi \int_0^H \rho(z) \sqrt{1 + \rho'(z)^2} dz$$

Para obtener la fuerza por unidad de superficie debemos dividir la fuerza total por la superficie, cuyo valor obtenemos de:

$$P_{media} = \frac{F_{total}}{A_{media}} = \frac{\int_0^H P(z) \rho(z) \sqrt{1 + \rho'(z)^2} dz}{\int_0^H \rho(z) \sqrt{1 + \rho'(z)^2} dz}$$

Comparación con el cilindro

El cilindro tiene un radio (R) constante a diferencia del hiperboloide que tiene un radio variable (se estrecha), el cilindro requiere de mas material para ser construido por su mayor área lateral

Area expuesta a la fuerza lateral del viento

Area expuesta del cilindro

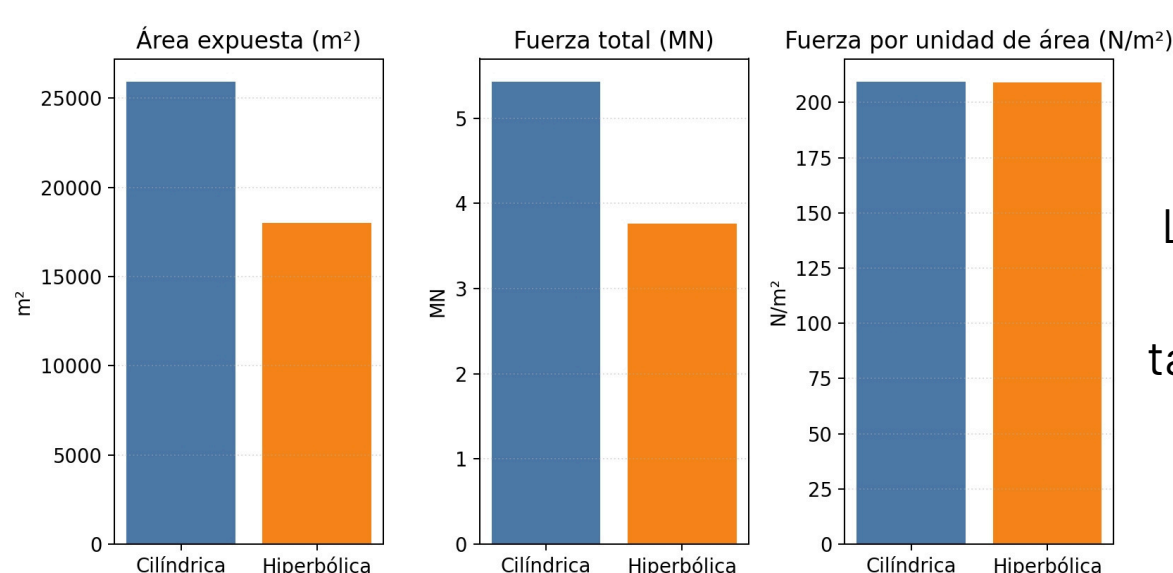
26000m²

>

Area expuesta del hiperboloide

18000m²

Comparativa cilindro vs hiperboloide (mitad expuesta)

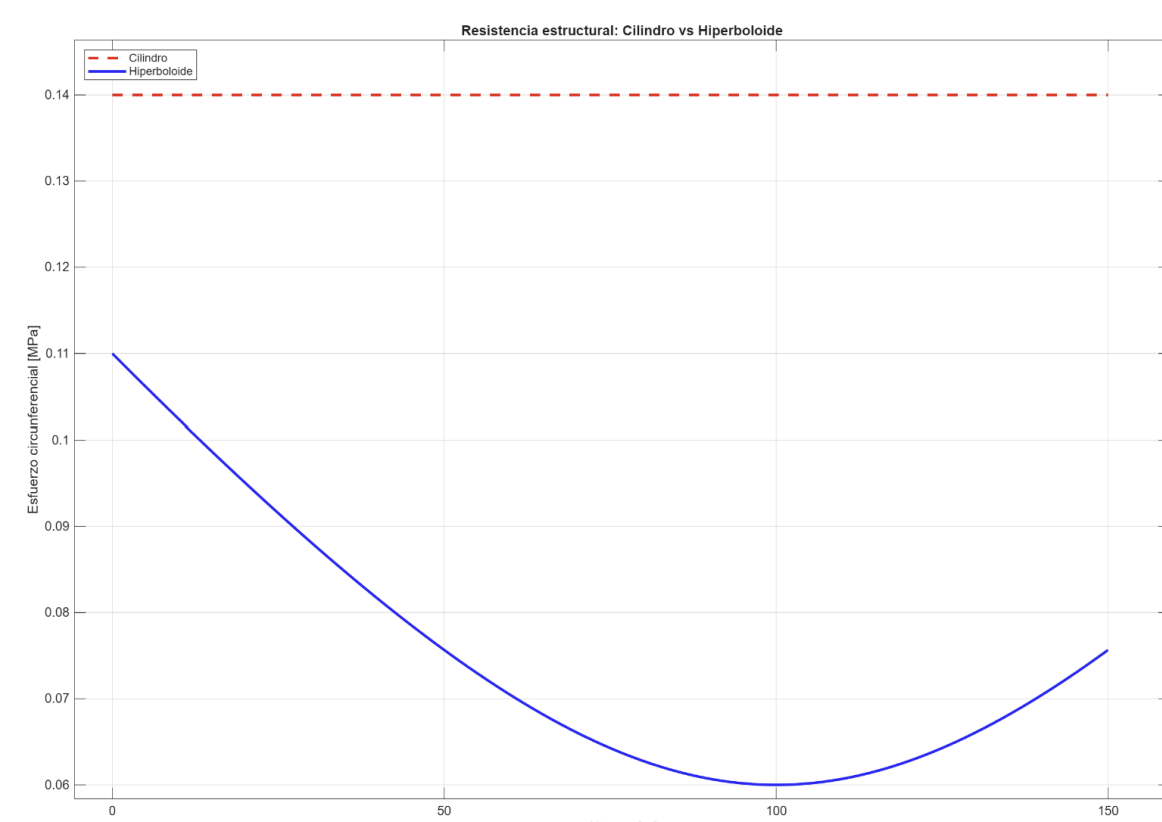


Fuerza por unidad de superficie

La presión soportada por el cilindro es mayor que la soportada por el hiperboloide, por lo tanto el hiperboloide es estructuralmente mas eficiente al ofrecer menor resistencia al viento.

Conclusiones en el análisis de presión del viento

Los resultados finales son los esperados. No solo el modelo cilíndrico requiere de más material (casi 8000 metros cuadrados), sino que también, al tener más superficie expuesta al viento, soporta mucha menos presión lateral (310 N/m² vs 209 N/m²) La doble curvatura del hiperboloide ayuda también a distribuir mejor las cargas a la base y reduce el efecto Von Kármán, que consiste en la formación de vórtices periódicos que comprometen considerablemente la estabilidad de la estructura.



Esfuerzo lateral con respecto a la altura (cilindro vs hiperboloide)

ANÁLISIS DE FLUJOS INTERNOS

Divergencia del campo de velocidades

Al tratarse de un flujo dominado por la componente vertical (Vz), la divergencia en coordenadas cilíndricas se simplifica a la variación del momento vertical respecto a la altura:

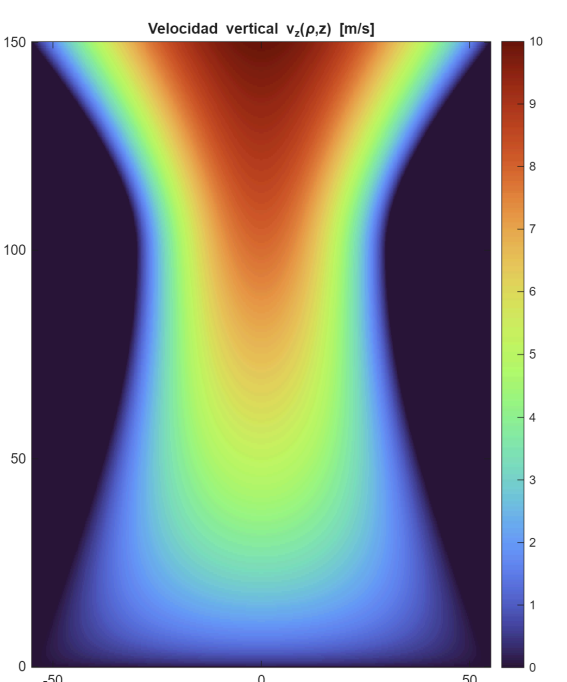
$$\nabla \cdot \mathbf{v} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z)$$

Tras operar con ello, llegamos a que la divergencia es positiva, con solución:

$$\nabla \cdot \vec{v} = v_{max} \left[\frac{2\rho^2 R'(z)}{R(z)^3} \cdot \left(\frac{z}{H}\right)^{0,6} + \left(1 - \frac{\rho^2}{R(z)^2}\right) \cdot \frac{0,6}{z} \left(\frac{z}{H}\right)^{0,6} \right]$$

Fisicamente, una divergencia positiva indica que el fluido se expande a medida que asciende. Esto se debe a:

1. Expansión térmica: El aire absorbe el calor, aumentando su temperatura y disminuyendo su densidad. Para conservar la masa, el gas debe aumentar su volumen.
2. Tiro vertical: Se acelera más rápido que lo que se ensancha (o estrecha), por tanto también se expande verticalmente ("estiramiento" del flujo).



Caudal volumétrico de aire en una sección a altura Z

El caudal a una altura Z se obtiene integrando el perfil de velocidad sobre la sección transversal de la torre (en coordenadas cilíndricas):

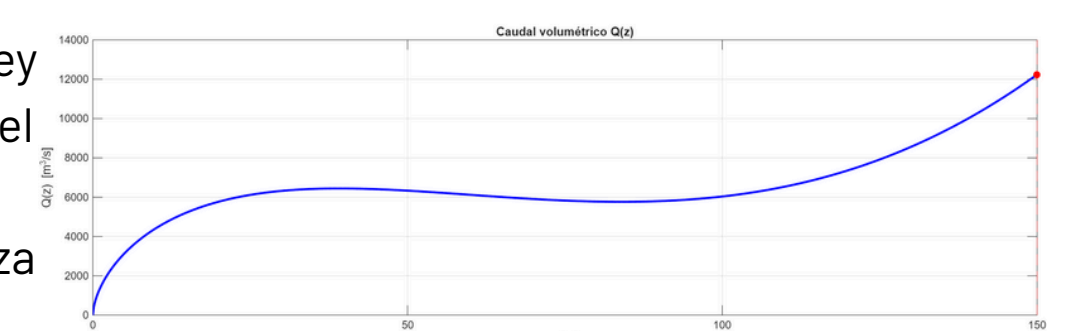
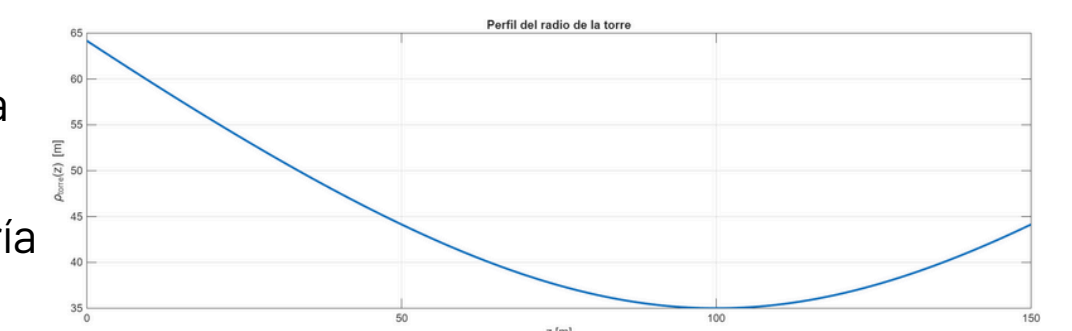
$$Q(z) = \iint_S v_z(\rho, z) dS = \int_0^{2\pi} \int_0^{R(z)} v_z(\rho, z) \cdot \rho d\rho d\theta$$

Tras resolver la integral, la expresión del caudal en función de la altura es la siguiente:

$$Q(z) = \frac{\pi}{2} v_{max} R(z)^2 \left(\frac{z}{H}\right)^{0,6}$$

Tras hallar el resultado de la integral, se llegan a las siguientes conclusiones:

- Variabilidad: El caudal no es constante; varía con la altura (z) y el radio (R(z)).
- Expansión del gas: Dado que el caudal volumétrico aumenta con la altura, por la ley de conservación de la masa, la densidad del aire debe estar disminuyendo.
- Punto Máximo: El caudal máximo se alcanza en la cima de la torre, donde la altura es máxima y el radio se ha vuelto a ensanchar.



Caudal volumétrico frente al perfil de la torre

Calculo del caudal disipado

Calculamos la potencia térmica disipada, con los datos proporcionados y la formula:

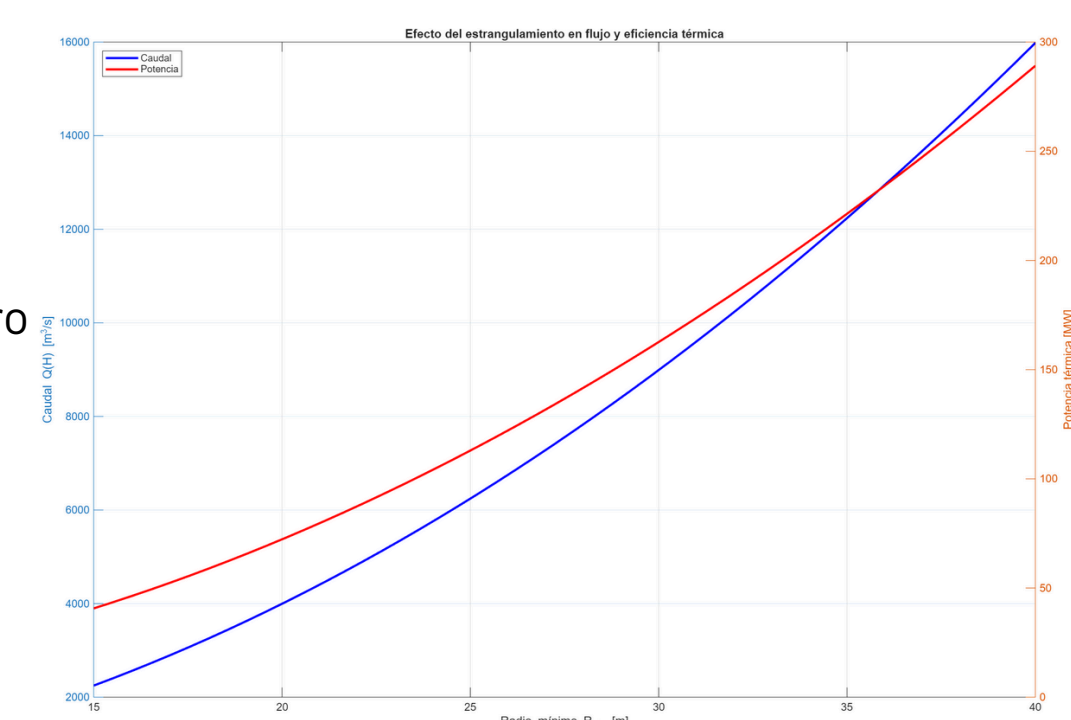
$$\dot{Q} = \rho_{aire} c_p Q(H) (T_{base} - T_{top})$$

Se analizó el impacto de estrechar la garganta (Rmin) de 30m a 20m para mejorar la resistencia estructural.

- Justificación Física: Se cumple Q=V*A. Si mantenemos la velocidad del tiro térmico pero reducimos la sección, la capacidad de evacuación de calor disminuye.

Existe un compromiso crítico en el diseño:

- Más estrecho: Mayor rigidez estructural y resistencia al viento.
- Más ancho: Mayor eficiencia térmica y potencia disipada.



Efecto del estrangulamiento sobre el caudal y la eficiencia térmica

Análisis del número de Reynolds en el flujo

En las torres hiperbólicas el número de Reynolds es extremadamente alto, en nuestro caso es:

$$Re = \frac{\rho v_{tip} L}{\mu} \approx 1,28 \cdot 10^7$$

Interpretación Física: Al ser Re >>> 2000, el régimen es altamente turbulento. Lejos de ser un problema, este caos en el fluido es beneficioso: genera grandes vórtices que mezclan el aire constantemente, maximizando la disipación del calor por convección.