

Estudio de integridad estructural de una chimenea expuesta a diferentes categorías de huracanes

Structural integrity study of a chimney exposed to different hurricane categories

Alejandro Palacios Méndez¹, Ilse J. Santa Rosa Vargas¹, Miguel A. Grarcía Maldonado¹, Germán A. Rodríguez Castro², Alfonso Meneses Amador²

¹ Tecnológico Nacional de México. Campus Poza Rica, Veracruz, México

² Instituto Politécnico Nacional. SEPI-ESIME-ZACATENCO, Ciudad de México, México
alejandro.palacios@itspozarica.edu.mx

Resumen

En los últimos años la frecuencia e intensidad de los huracanes se ha incrementado, causando desastres en los lugares donde impactan, con pérdidas humanas e infraestructura. México, debido a su ubicación entre el océano Atlántico y océano Pacífico, es propenso a sufrir daños debido a los ciclones tropicales, por lo que es importante realizar estudios estructurales para prevenir pérdidas humanas y materiales. Se realiza un análisis de la integridad estructural de una chimenea de sección variable, expuesta a fuerzas de presión que ejercen diversas categorías de huracanes. Las chimeneas son estructuras altas y esbeltas, sensibles a las excitaciones por el viento, por lo que se debe calcular la presión dinámica para realizar el diseño de estas. Con esta presión se evalúan los esfuerzos y las deformaciones en la chimenea, considerando los periodos de retorno de 10, 50 y 200 años. Se estima el factor de seguridad para cada estudio. Se encuentra que para el periodo de retorno de 200 años con una velocidad de diseño de 207.87 km/h la estructura no resiste la presión de viento a la que fue expuesta en la simulación. La chimenea solo podrá resistir huracanes categoría I y II, en el caso de la categoría III la integridad estructural se vería comprometida.

Palabras clave: Chimenea, integridad estructural, huracanes.

Abstract

In recent years the frequency and intensity of hurricanes has increased, causing disasters in the places where they impact, with human and infrastructure losses. In Mexico, due to its location between the Atlantic and Pacific oceans, it is likely to suffer damage due to tropical cyclones, so it is important to carry out studies on part of the infrastructure to prevent human and infrastructure losses. In this article, an analysis of the structural structure of a variable section chimney exposed to pressure forces exerted by various categories of hurricanes is carried out. As the chimneys are tall and slender structures, they are sensitive to wind excitations, so the dynamic pressure must be calculated to carry out the design. With this pressure, the stresses and strains in the chimney are evaluated considering the return periods of 10, 50 and 200 years. The safety factor is estimated for each study. It is found that for the return period of 200 years with a design speed of 207.87 km/h, the structure does not resist the wind pressure to which it was exposed in the simulation. The chimney will only be able to withstand category I and II hurricanes, in the case of category III the structural integrity would be compromised.

Keywords: Chimney, structural integrity, hurricanes

1. Introducción

Las chimeneas industriales son conductos contruidos para dar salida a la atmósfera a los gases resultantes de una combustión, para su dispersión en el ambiente. En la evaluación de la integridad estructural de estas intervienen dos factores fundamentales: el viento y el sismo. En el presente artículo se abordará directamente la acción del viento, debido a que una estructura mediante su acción puede sufrir deformación excesiva, fatiga, daño en elementos de apoyo como cimentación, anclas y vibración excesiva (Ávila, G. y Valdés, J., 2014).

Para el diseño de estructuras esbeltas, sujetas a cargas de viento, hay tres acciones a considerar: ráfaga de viento, vórtices alternantes y efectos de ovalización (PärTranvik y GöranAlpsten, 2002)

En estructuras esbeltas el primer modo es crítico para vórtices en estructuras de acero actuales, sujetas a cargas de viento. Debido a esto, se considera importante conocer el primer período natural. Como la chimenea es de sección variable se recurre a los métodos numéricos para encontrar una solución aproximada.

A continuación, se mencionan algunos autores que utilizan el método de elemento finito en sus investigaciones: Parra y Alberto (2010), realizaron un diagnóstico a la estructura de una chimenea mediante el método del elemento finito, para revisar las posibles causas de daños observados y predecir su comportamiento ante fuerzas sísmicas. En 2015, Kumar y Nagavinothini realizaron un estudio acerca del desprendimiento de vórtices en chimeneas de acero, que se analiza en este artículo y se utiliza en método de elemento finito para este propósito. Dai y Liu (2007) abordan el estudio de vibraciones mediante el método de elemento finito que mejora la precisión y la tasa de convergencia. En el año 1975, Nagaraj y Shanthakumar utilizaron el método de elemento finito de Galerkin, para determinar las vibraciones en las palas de un aerogenerador. Por otro lado, autores como Graham (2000), Mead (2001) y Meirovitch (2001), han aplicado la teoría de la viga Euler- Bernoulli para la determinación de las frecuencias y formas de vibración de la viga en voladizo. Güler (1998) presentó resultados de las frecuencias naturales de

algunas chimeneas considerando masa distribuida y rigideces obtenidos numéricamente. Finalmente, Palacios y Santa-Rosa (2015) han utilizado el método de elemento finito para determinar las frecuencias naturales de una chimenea de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Se realiza el análisis de la integridad estructural a diferentes fuerzas de presión que generan algunas categorías de huracanes. En la actualidad los huracanes se presentan con más intensidad y frecuencia; en México, por ejemplo, han impactado huracanes categoría V, como el de septiembre del año 2017 con velocidades de viento, según la escala de Saffir-Simpson, de más de 249 km/h (CENAPRED, 2019). En la Tabla 1 se encuentran las categorías según Saffir-Simpson.

Tabla 1. Categorías de huracanes según la escala Saffir-Simpson.

Categoría	Velocidad del viento
I	119-153 km/h
II	154-177 km/h
III	178-209 km/h
IV	210-249 km/h
V	≥250 km/h

CENAPRED (2019)

Para realizar el análisis estructural de la chimenea se tomó en cuenta el manual de diseño por viento, de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), el cual es utilizado como norma para el diseño de estas estructuras en México. En el manual se encuentra el procedimiento para el cálculo de la fuerza de presión para el diseño de estas estructuras. En las velocidades de diseño, utilizadas en el manual para diferentes periodos de retorno, se encuentran algunas categorías de huracanes consideradas para este análisis.

2. Métodos

2.1 Cálculo de carga de viento

En el análisis se utiliza la versión del año 2008, del manual de diseño por viento de CFE (Rao, 2003). La estructura que se analiza es una chimenea de sección variable, el material es acero estructural ASTM A36, con tres tipos de secciones: la base es de sección rectangular, la parte media es una transición de rectangular a circular, y la tercera sección es circular constante. Esta chimenea está localizada en la ciudad de Tuxpan, Veracruz, instalada en la central termoeléctrica, la cual se observa en la Figura 1. La chimenea se manufacturó con placa de 1/2 pulgada de espesor.

Se dice en Rao S. (2003) que, de acuerdo con el grado de seguridad de las estructuras, una chimenea debe contar con un grado de seguridad elevado y queda definida en el grupo A: estructuras con un grado de seguridad elevado, se incluyen en este grupo aquellas cuya falla cause la pérdida de un número importante de vidas, o perjuicios económicos o culturales excepcionalmente altos.



Figura 1. Chimenea de la Termoeléctrica de Tuxpan.

De acuerdo con la sensibilidad y respuesta dinámica ante la presencia del viento, esta chimenea está clasificada como tipo 3: estructuras que, por su alta relación de esbeltez o las dimensiones reducidas de su sección transversal, son sensibles a la turbulencia del viento y tienen periodos naturales que favorecen la ocurrencia de oscilaciones importantes por la acción del viento.

Categoría del terreno según su rugosidad: ocuparemos la categoría 1 que se refiere al terreno abierto, prácticamente plano, sin obstrucciones y superficies de agua.

A. Velocidad de diseño

La velocidad de diseño V_D es la velocidad a partir de la cual se calculan los efectos del viento sobre la estructura o sobre un componente de esta. La velocidad de diseño en km/h se obtendrá como:

$$V_D = F_T F_{rz} V_R \quad (1)$$

F_T es un factor que depende de la topografía del sitio, adimensional.

F_{rz} el factor que toma en cuenta el efecto de las características de exposición local, adimensional.

V_R la velocidad regional de ráfaga que le corresponde al sitio en donde se construirá la estructura, en Km/h.

B. Factor de Exposición

El factor F_{rz} se calcula con la ecuación:

$$F_{rz} = F_c \quad \text{si } z \leq 10 \quad (2)$$

$$F_{rz} = c \left[\frac{z}{10} \right]^\alpha \quad \text{si } 10 < z < \delta \quad (3)$$

donde:

z es la altura por encima del terreno natural, a la cual se desea conocer la velocidad de diseño, en m.

α es el exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura, adimensional.

δ la altura medida a partir del nivel del terreno de desplante, por encima de la cual la variación de la velocidad del viento no es importante y puede suponerse constante; a esta altura se le conoce como altura gradiente, en m.

c el coeficiente de escala de rugosidad, adimensional.

Las variables α , δ y c están en función de la rugosidad del terreno, los valores recomendados se presentan en la Tabla 2.

El terreno en el que está desplantada la estructura corresponde a categoría 1; tomando en cuenta esta consideración se obtienen los siguientes valores:

α toma el valor de 0.099

δ toma el valor de 245 m

c toma el valor de 1.137

Resolviendo el factor de exposición para nuestra chimenea, se tiene que tomar en cuenta que la altura de la chimenea es de 40 m, así que ocuparemos la ecuación (3) debido a que $10 < 40 < 245$.

$$F_{rz} = 1.137 \left[\frac{40}{10} \right]^{0.099}$$

$$F_{rz} = 1.3$$

C. Factor topográfico F_T

Este factor toma en cuenta el efecto topográfico local del sitio en donde se desplantará la estructura, como se observa en la Tabla 3.

Tabla 2 Categoría del terreno.

Categoría del terreno	α	$\delta(m)$	c
1	0.099	245	1.137
2	0.128	315	1.000
3	0.156	390	0.881
4	0.170	455	0.815

Tabla 3. Factor topográfico.

Sitio	Ejemplos de topografía local	F_T
Protegidos	Valles cerrados	0.9
Normales	Terreno prácticamente plano; campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores a 5 %	1.0

En este factor topográfico F_T se tomará en cuenta el valor de 1.0 que corresponde a un terreno prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores a 5 %.

D. Velocidad Regional

Se comenta en Rao S. (2003), que la velocidad regional de ráfaga de viento V_R es la velocidad máxima que puede ser excedida en un cierto periodo de retorno T , en años, en una zona o región determinada del país. La velocidad regional de ráfaga del viento, V_R en km/h se determina tomando en consideración tanto la importancia de la estructura como la localización geográfica de su sitio de desplante.

La velocidad regional toma el valor de 169 km/h teniendo en cuenta las condiciones más desfavorables para la estructura y un periodo de retorno de 200 años. En la Tabla 4 se presentan las secciones consideradas en el cálculo. La Tabla 5 muestra las variables α , δ y c consideradas y en la Tabla 6 se exhiben las velocidades de diseño. En la Figura 2 se muestran las secciones consideradas para el estudio y algunas dimensiones generales.

Tabla 4. Secciones consideradas.

Alturas (m)	Sección	V_R (Km/h)
22.1345	1	169
17.9355	2	169

Tabla 5. Factores en función de la rugosidad del terreno.

Sección	F_T	c	α	δ	F_{rz}
1	1	1.137	0.099	24.5	1.23
2	1	1.137	0.099	24.5	1.20

Tabla 6. Velocidades de diseño.

V_D (Km/h)	V_D (m/s)
207.87	57.74
202.8	56.33

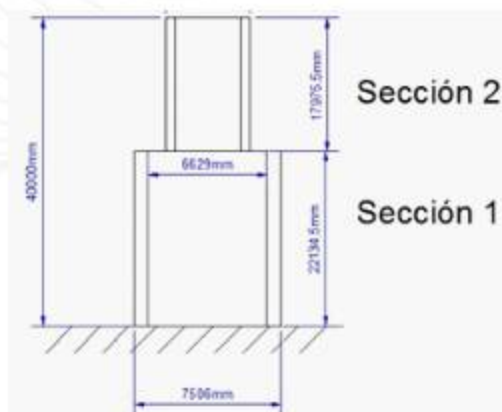


Figura 2. Esquemas de secciones consideradas.

E. Presión Dinámica de Base

Cuando el viento actúa sobre una construcción, genera presiones sobre sus superficies, que varían según la intensidad de la velocidad y la dirección del viento. La presión que ejerce el flujo del viento sobre una superficie plana perpendicular a él, se denomina presión dinámica de base q_z , en Pa, y se determina con la siguiente ecuación:

$$q_z = 0.047 G V_D^2 (\text{Pa}) \quad (4)$$

dónde:

G es el factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar.

V_D es la velocidad de diseño en km/h.

El valor de G se obtiene con la ecuación (5);

$$G = \frac{0.392\Omega}{273 + \tau} \quad (5)$$

dónde:

Ω es la presión barométrica, en mm de Hg.

τ es la temperatura ambiental en Centígrados.

En la Tabla 7 se presenta la relación entre los valores de la altitud, h , en metros sobre el nivel del mar (msnm) y la presión barométrica, Ω en mm de Hg (mercurio).

Considerando que la altitud h (msnm) en la ciudad de Tuxpan Veracruz, es de 30 msnm, se considera que su presión barométrica es de $\Omega=720$ (en mm de Hg), y su temperatura media anual en Celsius es de 25.2 C, se encuentra que $G=0.9464$ m.

En la Tabla 8 se muestran los valores obtenidos para la presión dinámica de base para los periodos de retorno de 10, 50 y 200 años.

3. Resultados

La definición de la geometría es el inicio para la creación de un elemento estructural por elementos finitos. El modelo se debe construir lo más parecido al real, ya que los resultados obtenidos al hacer el análisis dependen en gran medida del modelo geométrico. La chimenea de la cual se va a realizar el modelo se muestra en la Figura 3. Además, de acuerdo con Balachandran B. y Magrab B. E., (2005), dependen de las características del material utilizado y de las condiciones de operación del equipo.

Tabla 8. Presión dinámica de base.

Sección (200 años)	Ω	τ	G	V_D (Km/h)	q_z (Pa)
1	720	25.2	0.9464	207.87	1922.01
2	720	25.2	0.9464	202.8	1829.39
Sección (50 años)	Ω	τ	G	V_D (Km/h)	q_z (Pa)
1	720	25.2	0.9464	183.27	1494.01
2	720	25.2	0.9464	178.8	1422.02
Sección (10 años)	Ω	τ	G	V_D (Km/h)	q_z (Pa)
1	720	25.2	0.9464	151.29	1018.10
2	720	25.2	0.9464	147.6	969.04

Tabla 7. Relación entre altitud y presión barométrica.

Altitud h_m (msnm)	Presión barométrica Ω (en mm de Hg)
0	760
500	720
1000	675
1500	635

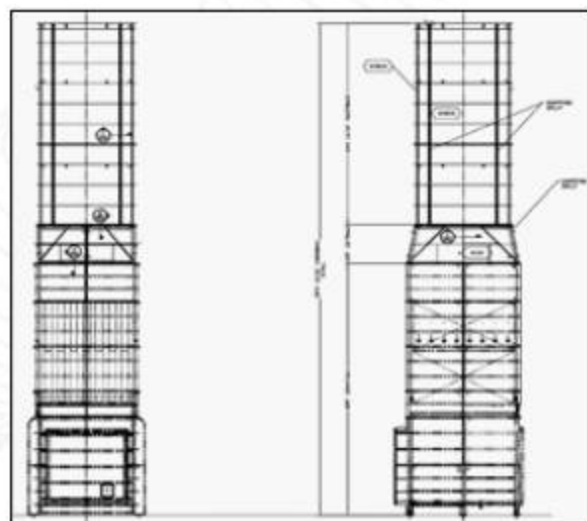


Figura 3. Dimensiones generales de la chimenea de sección variable.

En la definición de la geometría de la chimenea que se analiza, se elaborará un modelo en CAD en tres dimensiones, en la Figura 4 se observa la forma del modelo de la chimenea. Teniendo la geometría definida, se procede a la discretización del continuo. En este modelo no se consideran los elementos que proporcionan mayor rigidez a la estructura, solo las placas principales que conforman el cuerpo de la chimenea. Para el análisis de la chimenea se considera un modelo de superficies en tres dimensiones. El elemento seleccionado para el análisis es un Shell de 4 nodos (Balachandran B. y Magrab B. E., 2005). El elemento Shell de 4 nodos tiene la capacidad de una membrana y doblamiento, ambas son permitidas en el plano y normal a la carga, este elemento tiene 6 grados de libertad en cada nodo. Traslaciones en la dirección nodal x, y, z además de las rotaciones en los ejes x, y, z . El elemento se muestra en la Figura 5.

Estudios

Debido a que la base de la estructura no es cuadrada se analizan dos condiciones posibles para aplicar la fuerza ejercida por viento. La primera condición para aplicar esta fuerza de presión es donde uno de sus lados mide 6.642 m (Figura 4). La segunda condición donde mide 7.506 m, esto va a depender de la acción del viento y la instalación. En este estudio se tomará en cuenta, para cada condición, los periodos de retorno de 10, 50 y 200 años, para determinar el comportamiento de la estructura a diferentes velocidades de diseño y analizar si la chimenea de sección variable resiste la fuerza de presión ejercida. En la Figura 4 se muestra el modelo de la chimenea de sección variable con las condiciones de frontera generales en cada sección. Una de las condiciones donde se hace restricción en los seis grados de libertad es en la base. Para los estudios que se realizan las condiciones de frontera en la base son iguales. Varía la fuerza de presión ejercida por la acción del viento dependiendo el periodo de retorno a analizar y la ubicación de la carga.

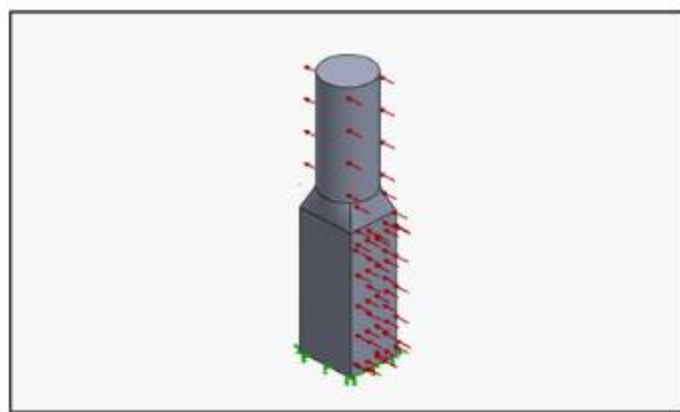


Figura 4. Condiciones de frontera de la chimenea.

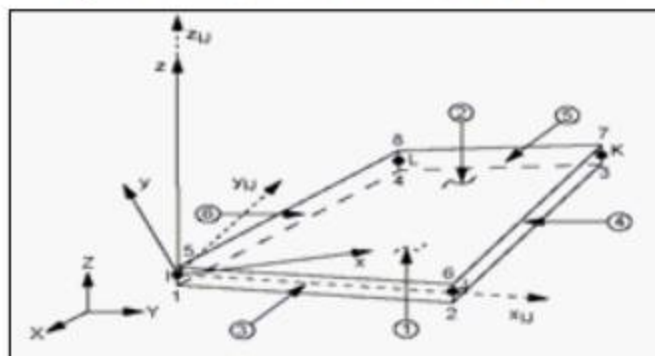


Figura 5. Elemento shell de 4 nodos.

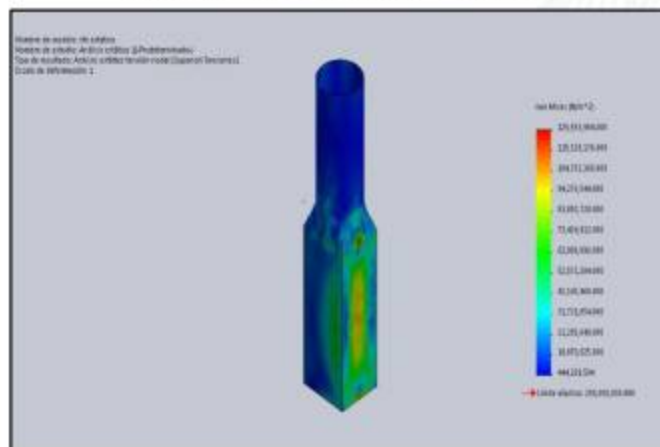


Figura 6. Esfuerzos de Von Mises de la chimenea.

F. Estudio de la chimenea con un periodo de retorno de 10 años.

Haciendo los cálculos para la primera condición con un programa comercial de elementos finitos se encuentra que el esfuerzo de Von Mises máximo es 125.53 MPa y el esfuerzo mínimo de 444 Pa. Ver Figura 6.

En esta condición de carga la chimenea no tiene deformación permanente, debido a que está dentro de la zona elástica. En la Figura 7 se visualiza la zona en la estructura donde hay mayor deformación, ubicada en la parte cilíndrica.

Se identifica el factor de seguridad de 1.8 para este periodo de retorno (ver Figura 8). Esto indica que la estructura resiste la fuerza de presión en estas condiciones de carga.

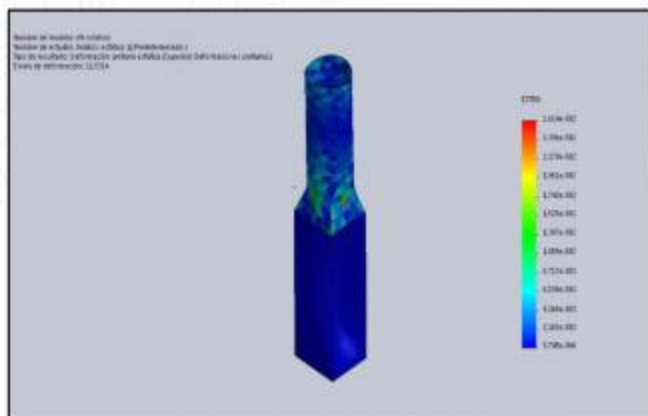


Figura 7. Deformación unitaria de chimenea.

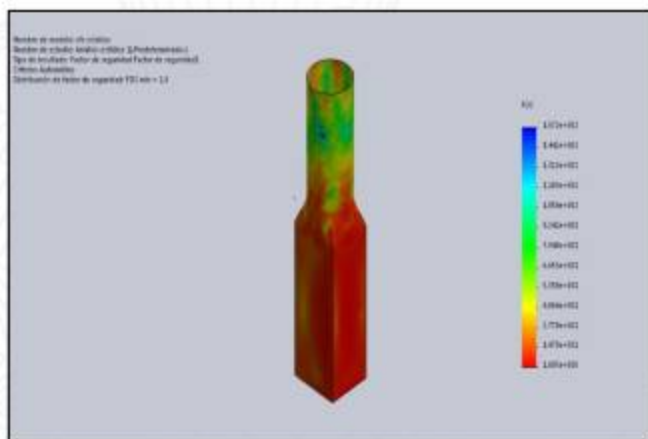


Figura 8. Factor de seguridad de chimenea.

Continuando con el análisis para un periodo de retorno de 10 años en la segunda condición, el esfuerzo máximo es de 140.67 MPa y el esfuerzo mínimo 853.49 Pa. El factor de seguridad dado para este estudio es de 1.5.

G. Estudio de la chimenea con un periodo de retorno de 50 años.

Al realizar el análisis para la primera condición con las fuerzas de presión para este periodo de retorno, el esfuerzo máximo es de 184.24 MPa y el esfuerzo mínimo es de 651.8 Pa. El factor de seguridad de 1.2.

Realizando los análisis correspondientes para la condición dos, el esfuerzo no sobrepasa el límite elástico, el esfuerzo máximo encontrado es de 206.4 MPa y el esfuerzo mínimo es de 125.2 MPa. El factor de seguridad para esta condición es 1.

H. Estudio de la chimenea con un periodo de retorno de 200 años.

Los cálculos muestran que el esfuerzo máximo en la chimenea es de 237.02 MPa y el esfuerzo mínimo es de 838.59 MPa. El factor de seguridad para este periodo de retorno es de 0.96.

Para la segunda condición el esfuerzo máximo encontrado es de 265.58 MPa y el esfuerzo mínimo es de 161.1 MPa. La estructura tiene deformación permanente debido a que sale de la zona elástica. El factor de seguridad es 0.81.

Conclusiones

En el periodo de 10 años en ambas condiciones se observó que la chimenea resiste las fuerzas de presión, con un factor de seguridad que varía de 1.8 a 1.5. Para el periodo de retorno de 50 años ambos casos resisten las fuerzas de presión calculadas, ya que se encuentran los esfuerzos dentro de la zona elástica y el factor de seguridad no es menor de 1. Finalmente, para el periodo de retorno de 200 años para el primer estudio (base menor) su factor de seguridad es de 0.96. En el segundo estudio el factor de seguridad es de 0.81, esto significa que no resistirá las presiones calculadas en este periodo de retorno en ambos casos. Basado en las velocidades de diseño previamente estimadas y factores de seguridad calculados, la chimenea es segura en ambas condiciones, no sufre daño estructural para velocidades viento de un huracán categoría II como máximo, donde las velocidades del viento oscilan entre 154-177 km/h.

Ávila, J.G. y Valdés, V.J. (2014). Efectos dinámicos de Viento en Chimeneas Industriales de Acero. GEEMC (Grupo de Estructuras y Mecánica Computacional). México: Universidad de Guadalajara.

Balachandran B. y Magrab B. E. (2005). Vibraciones. Cengage Learning Latin America, ISBN: 9706864954, 9789706864956

Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2019). Ciclones Tropicales. (CENAPRED). Versión Electrónica ISBN: 978-970-821-008-9

Dai K. & Liu G.R. (2007). Free and forced vibration analysis using the smoothed finite element method (SFEM). *Journal of Sound and Vibration*. 301. 803 - 820. Retrieved from http://www.ase.uc.edu/~liugr/Publications/Journal%20Papers/2007/JA_2007_03.pdf

Mead, D. (2001). *Mechanical and Structural Vibrations: Theory and Applications* J.H. Ginsberg John Wiley and Sons, Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO19 1UD, UK. 2001. 692pp. Illustrated. £32.95. ISBN 0-471-27084-3. *The Aeronautical Journal* (1968), 105(1051), 534-550. doi:10.1017/S000192400001798X

Güler, K. (1998). Free vibrations and modes of chimneys on an elastic foundation. *Journal of Sound and Vibration - J SOUND VIB*. 218. 541-547. 10.1006/jsvi.1998.1244.

Kelly, S. G. (2000). *Fundamentals of Mechanical Vibrations*. Universidad de Michigan: McGraw-Hill.

Kumar, T., & Nagavinothini, R. (2015). Wind Analysis and Analytical Study on Vortex Shedding Effect on Steel Chimney using CFD. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*. 4 (4). ISSN:2278

Manual de Diseño de Obras Civiles Diseño por viento (2008). México, D.F: México.

Meirovitch, L. (2001). *Fundamentals of Vibrations*. New York: McGRAW-HILL International Edition.

Nagaraj V.T. & Shanthakumar P. (1975). Rotor blade vibrations by the galerkin finite element method. *Journal of Sound and Vibration*. 43(3), 575-577. doi: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(75\)90013-9](https://doi.org/10.1016/0022-460X(75)90013-9).

Palacios, M. A. y Santa-Rosa, V. I. (2015) Cálculo de los periodos naturales de una Chimenea de CFE. *Academia Journals*. ISBN 978-1-939982-12-4

Parra, G. N. y Alberto, M. H. (2010). "Reinforced concrete chimneys' structural behaviour: the case of the Termotasajero S. A. chimney". *Dearq* 6, 172-177. doi: <https://doi.org/10.18389/dearq6.2010.17>

PärTranvik & GöranAlpsten. (2002). *Dynamic Behaviour under Wind Loading of a 90 m Steel Chimney*, Alston Power Sweden AB. Retrieved from <https://stbk.se/S01041-Report.pdf>

Rao S.S. (2003). *Mechanical Vibrations*. United States of America: Prentice Hall. 021. Space-X Exploration Technologies Corporation