



# Title: Diseño y simulación preliminar del cubo del rotor para una turbina eólica de 50-kW clase II, de acuerdo a la norma IEC-61400-2

## Authors: COLÍN-MARTINEZ, José Luis, LÓPEZ-GARZA, Víctor, HERNÁNDEZ-ARRIAGA, Isaac y NAVARRO-ROJERO, María Guadalupe

Editorial label ECORFAN: 607-8695  
BCIERMMI Control Number: 2020-04  
BCIERMMI Classification (2020): 211020-0004

Pages: 14  
RNA: 03-2010-032610115700-14

**ECORFAN-México, S.C.**  
143 – 50 Itzopan Street  
La Florida, Ecatepec Municipality  
Mexico State, 55120 Zipcode  
Phone: +52 1 55 6159 2296  
Skype: ecorfan-mexico.s.c.  
E-mail: contacto@ecorfan.org  
Facebook: ECORFAN-México S. C.  
Twitter: @EcorfanC

[www.ecorfan.org](http://www.ecorfan.org)

Holdings		
Mexico	Colombia	Guatemala
Bolivia	Cameroon	Democratic
Spain	El Salvador	Republic
Ecuador	Taiwan	of Congo
Peru	Paraguay	Nicaragua

# Contenido

Introducción

Metodología

Resultados

Conclusiones

Referencias



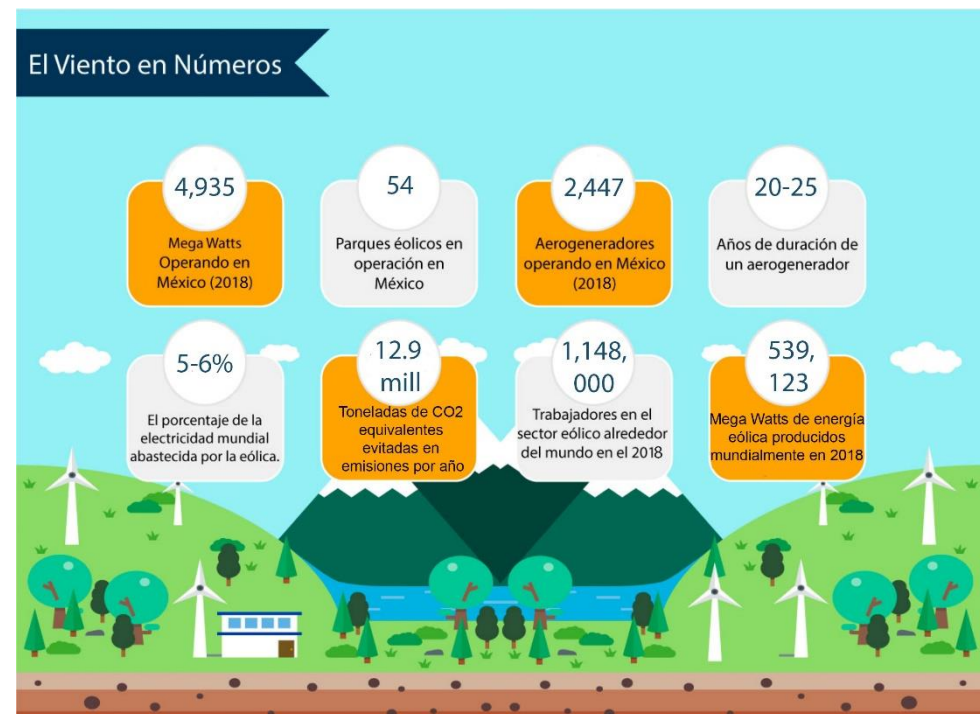
# Introducción

En los últimos años, el sector de energía eólica en México ha crecido considerablemente con más de 50 parques eólicos en donde se encuentran alrededor de 2400 aerogeneradores operando según la AMDEE sin embargo, un área en específico que se desarrolla lentamente es la fabricación de equipos y componentes para la energía eólica.

Durante la Administración Federal 2018-2024 existen proyectos ya identificados y en desarrollo suficientes para prácticamente **triplicar** la capacidad instalada de 2018 y operar en 18 estados.

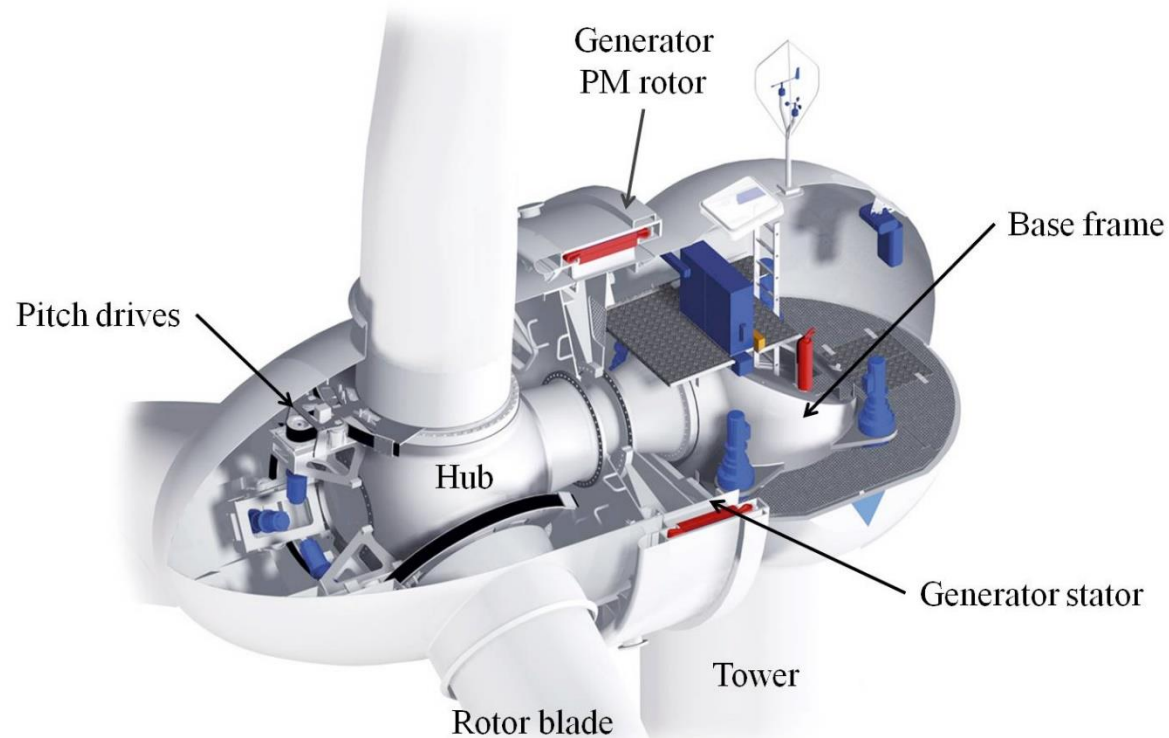


Capacidad total esperada para 2024 – 15,000 MW



# Introducción

En este trabajo se realizó el diseño preliminar del cubo, el cual es el componente del rotor encargado de transmitir la energía mecánica de las aspas al tren de potencia y a su vez al generador eléctrico



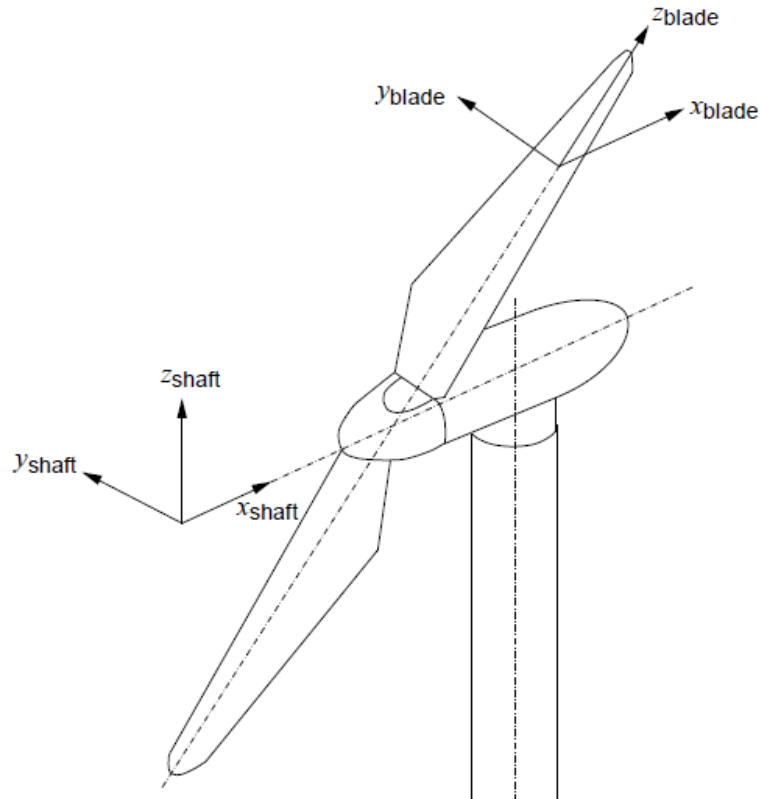
Partes del aerogenerador



Diseño anterior del cubo

# Metodología

La Norma IEC 61400-2 Parte 2:  
Pequeños Aerogeneradores,  
propone utilizar el Método de  
Cargas Simplificadas



Sistema coordenado del aerogenerador

Situación de diseño	Hipótesis de carga		Tipo de análisis
Producción de energía	A	Operación normal	F
	B	Orientación	U
	C	Error de orientación	U
	D	Empuje máximo	U
Producción de energía de más ocurrencia de fallo	E	Velocidad de rotación máxima	U
	F	Cortocircuito en la conexión de carga	U
Parada	G	Desconexión (frenado)	U
Carga extrema del viento	H	Carga extrema del viento	U
Condiciones de inmovilización y de falta	I	Inmovilización con carga del viento y exposición máxima	U
Transporte, montaje, mantenimiento y reparación	J	Deberá estar indicado por el fabricante.	U



# Metodología

Las cargas a considerar para el diseño del cubo deben ser las que actúan en la interacción entre el álabe, eje principal y cubo. Dichos casos de carga son tomados en base a la norma IEC 61400-2

## Caso de carga A: Operación normal.

Cargas en el Aspa:

$$\Delta F_{zB} = 2mBRcog\omega n^2, design \quad (1)$$

$$\Delta M_{xB} = \frac{Q_{design}}{B} + 2mBgRcog \quad (2)$$

$$\Delta M_{yB} = \frac{\lambda_{design} Q_{design}}{B} \quad (3)$$

$$\Delta F_{x - shaft} = \frac{3}{2} \frac{\lambda_{design} Q_{design}}{R} \quad (4)$$

$$\Delta M_{x - shaft} = Q_{design} + 2mrger \quad (5)$$

$$\Delta M_{shaft} = 2mrgLrb + \frac{R}{6} \Delta F_{x - shaft} \quad (6)$$

## Caso de carga D: Empuje máximo.

Las cargas de empuje actúan en paralelo con el eje del rotor y tiene un valor máximo dado por:

$$F_{x-shaft} = C_T 3,125 \rho V_{ave}^2 \pi R^2 \quad (7)$$

Donde  $C_T$  es el coeficiente de empuje, igual a 0.5.

## Caso de carga H: Cargas extremas de viento.

Cargas de turbina en paro:

$$M_{yB} = Cd \frac{1}{4} \rho V^2 e50 A_{proj,B} R \quad (8)$$

$$F_{x - shaft} = B \times Cd \frac{1}{2} \rho V^2 e50 A_{proj,B} \quad (9)$$

Para la turbina en movimiento:

$$M_{yb} = C_{lmax} \frac{1}{6} \rho V^2 e50 A_{proje,B} R \quad (10)$$

$$F_{x - shaft} = 0.17 B A_{proj,B} \lambda_{e50}^2 V_{e50}^2 \quad (11)$$

$$\lambda_{e50} = \frac{\eta_{max} \pi R}{30 V_{e50}} \quad (12)$$

# Metodología

El método solo aplicará para turbinas de eje horizontal teniendo 2 o más aspas en voladizo, con sistemas coordinado de pitch y cubo rígido. Se definieron los siguientes parámetros de entrada obtenidos del diseño de la turbina y el origen geográfico donde se instalará el aerogenerador, estos datos se muestran en la tabla.

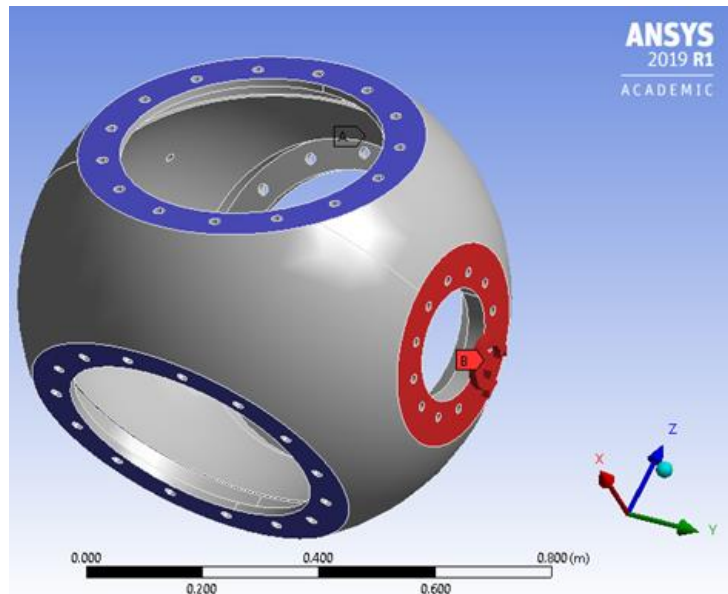
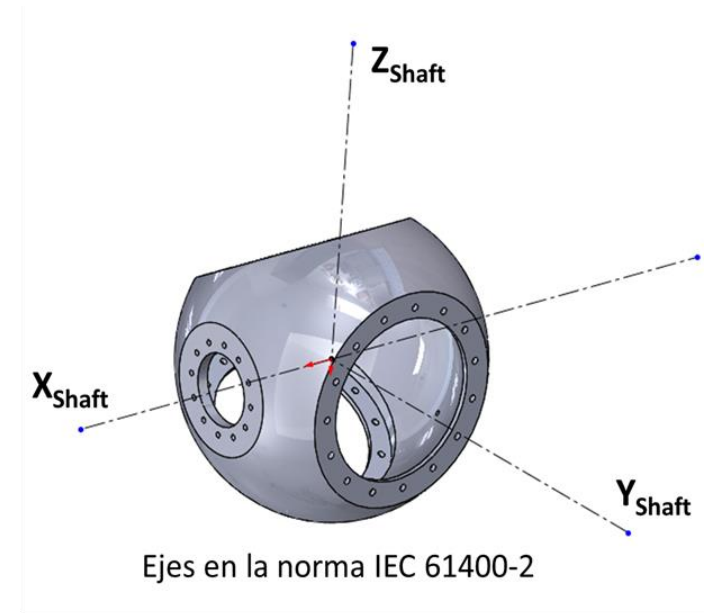
Parámetro	Valor	Símbolo	Unidad
Densidad del aire	1.18	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>
Gravedad	9.81	g	m/s <sup>2</sup>
Velocidad promedio de viento	8.5	$V_{ave}$	m/s
Numero de aspas	3	B	N/A
Radio del rotor	6	R	m
Área proyectada de las aspas	113.09	$A_{projB}$	m <sup>2</sup>
Coefficiente de arrastre	1.5	$C_d$	N/A
Coefficiente de empuje	0.5	$C_T$	N/A
Masa del rotor (HUB + Blade)	860	$m_r$	kg
Velocidad extrema registrada una vez en 50 años	16.16	$Ve50$	m/s
Relación de velocidad en punta de diseño	5.91	$\lambda_{design}$	N/A
Torque del eje de diseño	70.76	$Q_{design}$	Nm
Distancia del centro de gravedad del rotor al eje de rotación (excentricidad)	0.03	$e_r$	m

# Metodología

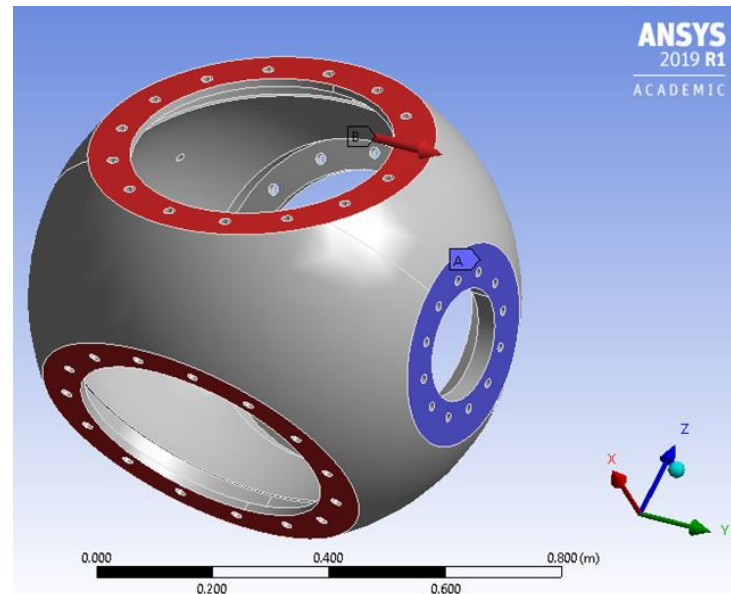
Propiedades del acero estructural		
Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	7850	Kg/m <sup>3</sup>
Esfuerzo a la fluencia	250	MPa
Esfuerzo a la tensión	400-500	MPa
Elongación mínima en 50mm	23%	
Módulo de elasticidad	200	GPa
Espesor del material	0.06	m



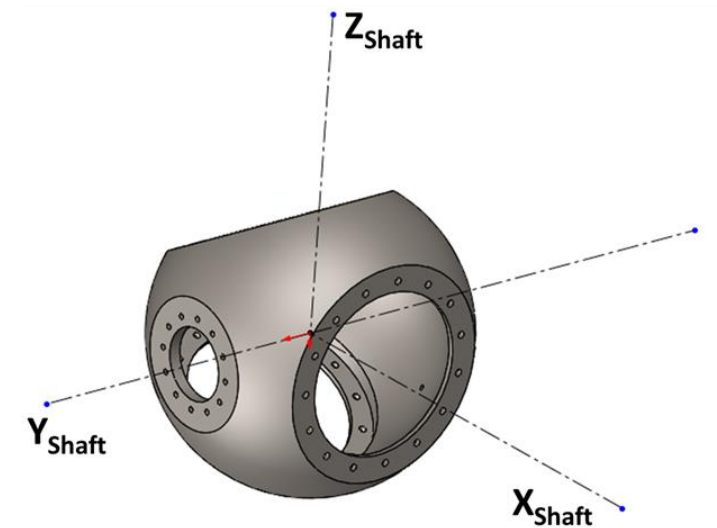
a) Cubo de fundición    b) Cubo maquinado



Configuración del caso de carga A, D y H. (Fuerzas sobre el eje X)



Configuración del caso de carga A (momento en el eje X)



Ejes en ANSYS



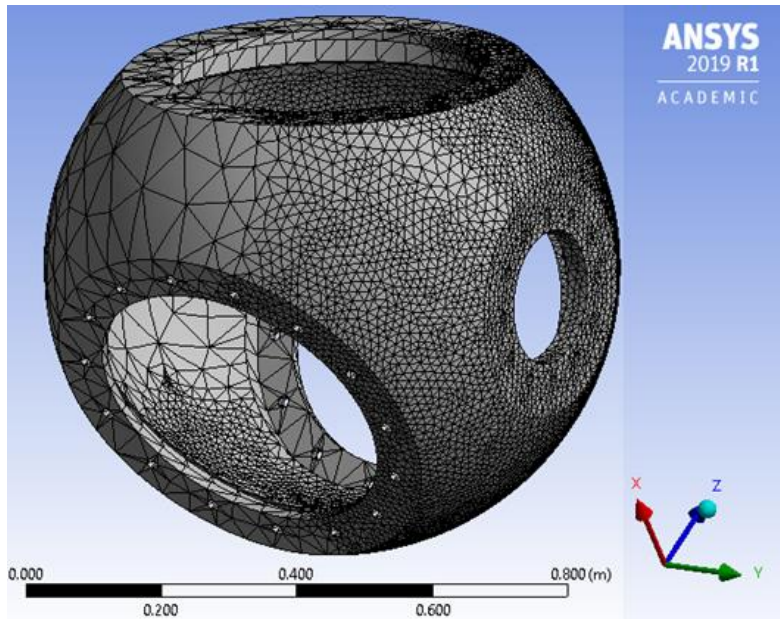
# Resultados

Con los parámetros de entrada se calculan los momentos y fuerzas con las ecuaciones establecidas anteriormente de acuerdo a la Norma IEC 61400-2, los resultados obtenidos se muestran en la tabla.

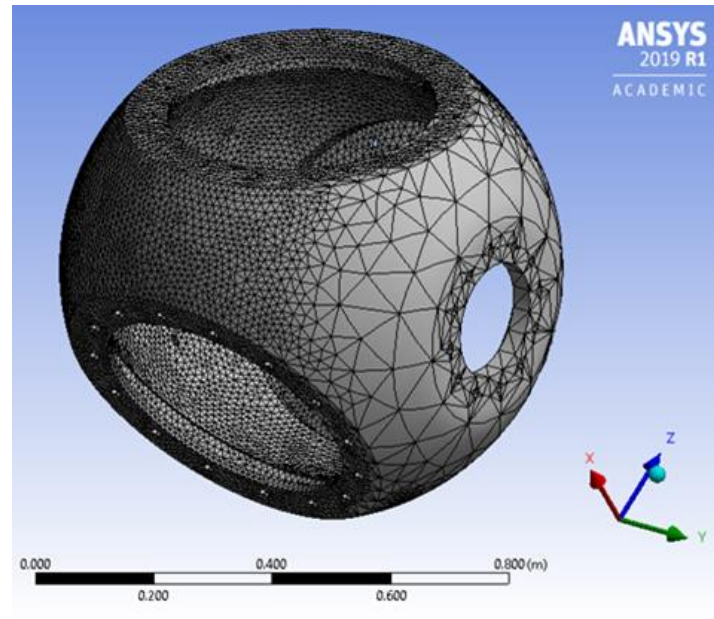
Caso de carga A: Operación normal.				
Ec.	Descripción	Valor SLM	Unidades	Símbolo
4	Empuje en el eje x	104.61	N	$\Delta F_{x\text{-shaft}}$
5	Momento en el eje x	576.95	Nm	$\Delta M_{x\text{-shaft}}$
Caso de carga D: Empuje máximo.				
Ec.	Descripción	Valor SLM	Unidades	Símbolo
7	Máximo empuje en el eje x	15065.80	N	$F_{x\text{-shaft}}$
Caso de carga H: Cargas extremas de viento.				
Ec.	Descripción	Valor SLM	Unidades	Símbolo
9	Máximo empuje en el eje x	83337.17	N	$F_{x\text{-shaft}}$

# Resultados

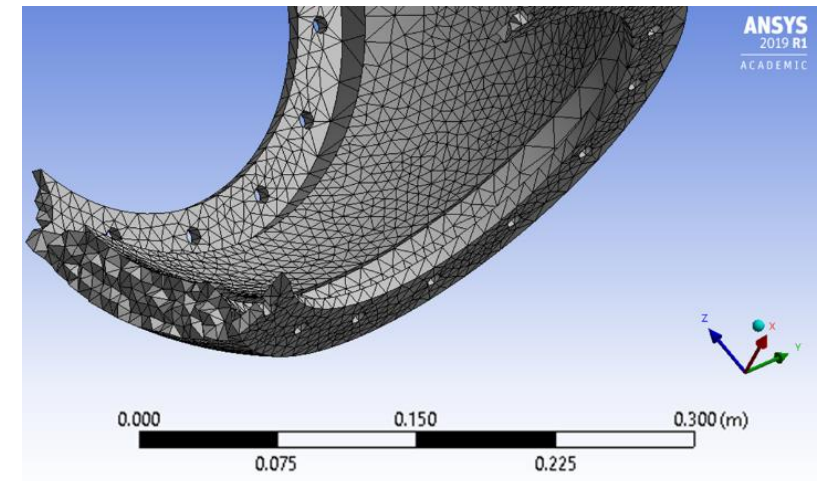
La herramienta utilizada para el mallado fue el body sizing en donde se configuró el tipo de la esfera de influencia con un radio de 0.5 m teniendo su origen exactamente en el centro de la conexión del cubo con la flecha del tren de potencia.



Mallado para el caso de carga A (Momento en X).



Mallado para los casos de carga A, D y H (Fuerzas en X).



Detalle de la malla interna refinada para el caso de carga A

# Resultados

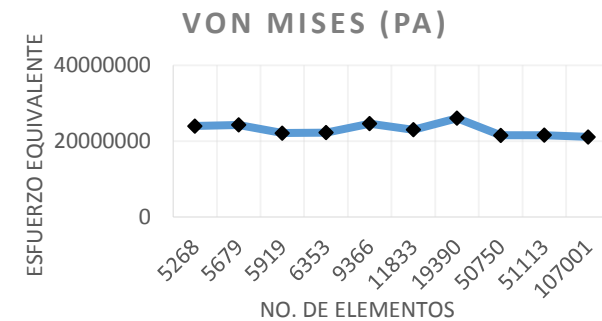
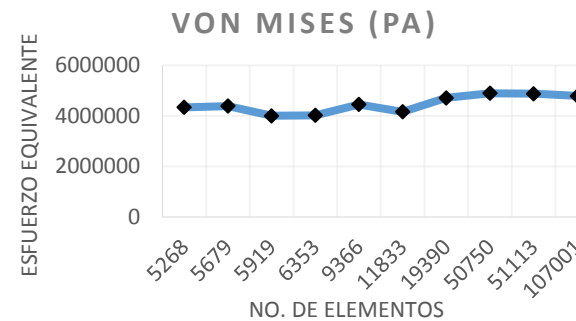
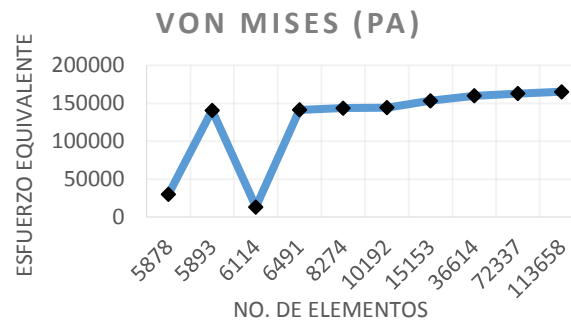
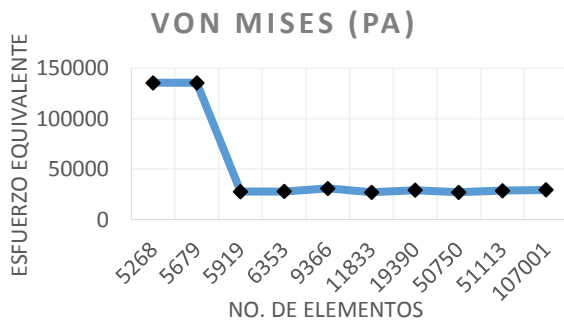
Se realizó el proceso de convergencia de malla, esto para asegurar la solución del problema, se realizaron 10 simulaciones con 3 análisis: el máximo esfuerzo, el esfuerzo equivalente de Von Mises y la deformación.

Caso de carga A: Empuje en el eje X			
Elementos	Máximo esfuerzo (Pa)	Von Mises (Pa)	Deformación (m)
5268	32673	135350	6.42E-08
5679	33056	135350	6.50E-08
5919	30796	27825	6.52E-08
6353	30958	27937	6.53E-08
9366	33496	30933	6.65E-08
11833	31907	27082	6.69E-08
19390	31384	29119	6.72E-08
50750	31067	27082	6.76E-08
51113	32207	28722	6.22E-08
107001	33004	29544	6.76E-08

Caso de carga A: Momento en el eje X			
Elementos	Máximo esfuerzo (Pa)	Von Mises (Pa)	Deformación (m)
5878	85372	30152	7.31E-08
5893	85372	140620	7.29E-08
6114	86097	13239	7.30E-08
6491	89125	141410	7.33E-08
8274	105150	143680	7.34E-08
10192	97111	144360	7.35E-08
15153	109350	153390	7.36E-08
36614	127450	159820	7.35E-08
72337	128850	162852	7.34E-08
113658	128580	165200	7.39E-08

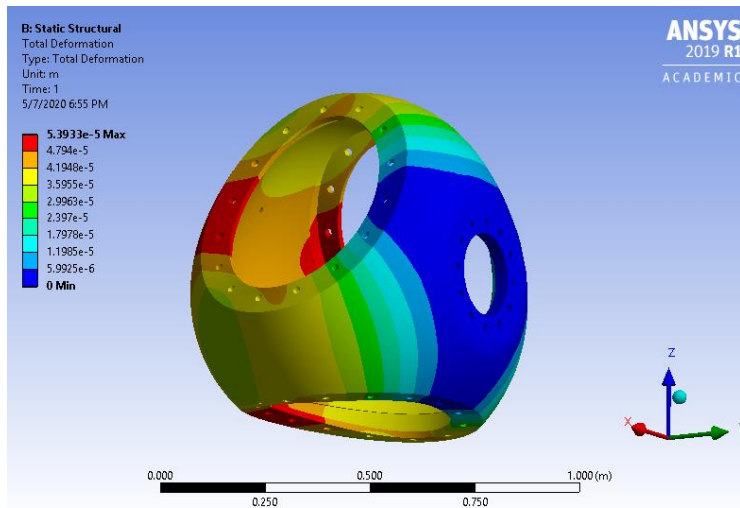
Caso de carga D: Máximo empuje en el eje X			
Elementos	Máximo esfuerzo (Pa)	Von Mises (Pa)	Deformación (m)
5268	4705500	4342500	9.25E-06
5679	4760700	4394100	9.37E-06
5919	4435200	4007300	9.39E-06
6353	4458500	4023500	9.41E-06
9366	4825100	4455000	9.58E-06
11833	4595200	4165100	9.63E-06
19390	4133700	4715600	9.67E-06
50750	4474200	4900400	9.73E-06
51113	4538400	4880500	8.96E-06
107001	4876300	4792800	9.73E-06

Caso de carga H: Máximo empuje en el eje X			
Elementos	Máximo esfuerzo (Pa)	Von Mises (Pa)	Deformación (m)
5268	26029000	24021000	5.12E-05
5679	26334000	24306000	5.18E-05
5919	24534000	22166000	5.20E-05
6353	24663000	22256000	5.20E-05
9366	26685000	24643000	5.30E-05
11833	25418000	23045000	5.33E-05
19390	28397000	26086000	5.35E-05
50750	24749000	21575000	5.38E-05
51113	25657000	21578000	4.95E-05
107001	26148000	21146000	5.38E-05

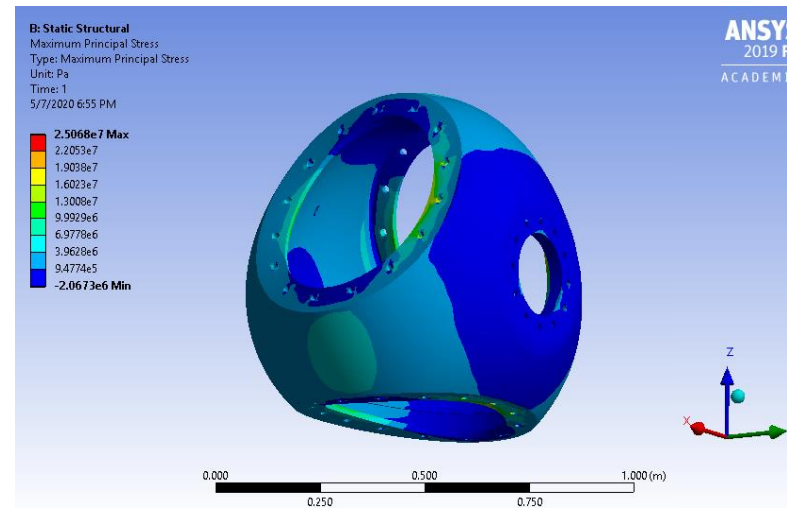


# Resultados

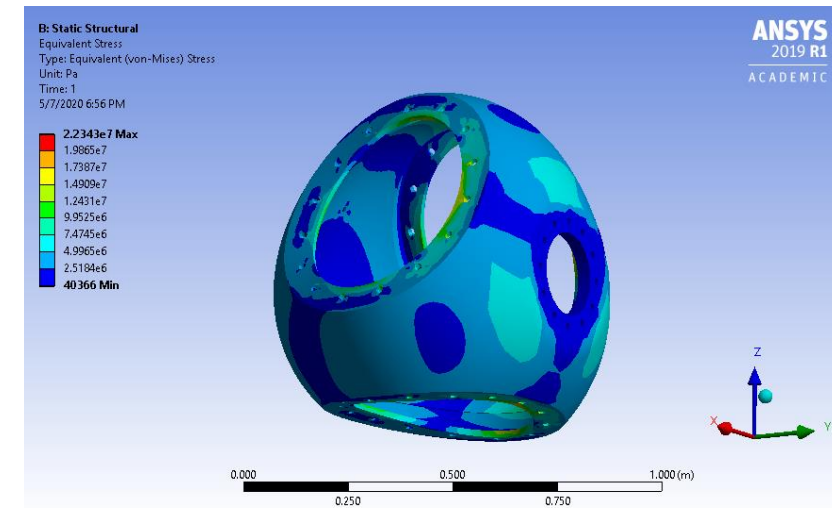
Una vez que se obtiene la convergencia de la malla, se pueden asegurar que los resultados de cada caso de carga son confiables y se pueden tomar estos datos para el rediseño posterior del cubo. A continuación, se muestra los resultados de las simulaciones del caso de carga D.



*Resultado del análisis de deformación del caso de carga D.*



*Resultado del esfuerzo máximo del caso de carga D.*



*Resultado del análisis de la teoría de falla de Von Mises del caso de carga D.*

# Resultados

Los resultados del caso de carga D son los que se toman en cuenta en esta simulación ya que es el caso de carga mas extremo, al cual va a estar expuesto las aspas que a su vez transmitirán esas fuerzas al cubo del rotor.

Los resultados de estas simulaciones fueron los siguientes:

Caso de carga	Deformación (mm)	Máximo esfuerzo (MPa)	Von Mises (MPa)
<b>Caso de carga D: Máximo empuje.</b>	0.0539	10.3	12.43



# Conclusiones

Los resultados obtenidos son satisfactorios para el material que se eligió para hacer la simulación, sin embargo, se deben de hacer más simulaciones del cubo considerando otro tipo de acero y una vez que se tenga el diseño de los componentes del aerogenerador (Aspas, tren de potencia góndola, sistemas de control etc.) se podrá dimensionar el cubo tomando en cuenta el diseño para el ensamble con otros componentes auxiliares.

# Referencias

- Aguilar-Acevedo, F. M.-V.-L.-P.-S.-B. (2020). Modelado Euler-Lagrange del rotor de un.
- AMDEE. (2018). Asociación Mexicana de Energía Eólica . Obtenido de <https://amdee.org/>
- Anil Mital, S. N. (Noviembre de 2017). Ingeniería de Manufactura en el siglo XXI.
- ANSYS Workbench R1 ACADEMIC. (2019).
- Buenestado, J. F. (2017). ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN AEROGENERADOR MEDIANTE SIMULACIÓN 3D DE DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS. Madrid España.
- Claudia Marcela Sánchez R, C. J. (14 de Octubre de 2005). Conceptos de diseño para manufactura (DFM) de piezas microfundidas.
- DE OLIVEIRA, V. H. (2020). DIMENSIONAMENTO GEOTÉCNICO DA FUNDAÇÃO DE UMA TURBINA EÓLICA.
- DNV RISO. (2002). Guidelines for desing of wind turbines. Denmark.
- Fernández Guevara, A. (2020). Diseño de un parque híbrido de 15MW aplicado en la provincia de Celendín, región Cajamarca.
- Funes Castro, S. (2020). Caracterización de una turbina mareomotriz de eje vertical.
- IEC. (2013). INTERNATIONAL STANDRD IEC 61400. Suiza.
- IFM. (2017). Sistema pitch eléctrico en un aerogenerador sin multiplicadora. Recuperado el Marzo de 2020, de [http://eval.ifm-electronic.com/ifmmx/web/apps-by-industry/cat\\_060\\_010\\_010.html](http://eval.ifm-electronic.com/ifmmx/web/apps-by-industry/cat_060_010_010.html)
- J.F. Manwell, J. M. (2009). WIND ENERGY EXPLANINED. UK: WILEY.
- Krishnappa, L. (2015). Fatigue Analysis of a 7.5 MW wind turbine rotor hub. Hannover, Alemania.
- Scitechdaily. (2 de January de 2020). Obtenido de Successful Test for Superconducting 3.6-Megawatt Wind Turbine: <https://scitechdaily.com/successful-test-for-superconducting-3-6mw-wind-turbine/>
- SolidWorks. (2016).
- SUMITEC. (2017). Acero estructural A36. México.
- Warmerdam, M. P. (2017-2018). Aerodinámica de aerogenerador de eje horizontal de 500 kW. La Rioja España.
- Crónica de Xalapa. (2016, Noviembre 11). Los Cuates del MAX aprenden sobre los aerogeneradores. Retrieved from <http://cronicadexalapa.com/los-cuates-del-max-aprenden-sobre-los-aerogeneradores/>
- reve. (2013, Febrero 12). Retrieved from Eólica: aerogeneradores de Goldwind para dos parques eólicos chilenos: <https://www.evwind.com/2013/02/12/eolica-aerogeneradores-de-goldwind-para-dos-parques-eolicos-chilenos/>



**ECORFAN®**

© ECORFAN-Mexico, S.C.

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162,163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169,209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. BCIERMMI is part of the media of ECORFAN-Mexico, S.C., E: 94-443.F: 008- ([www.ecorfan.org/](http://www.ecorfan.org/) booklets)