

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES  
ESTRUCTURALES DE UN AEROGENERADOR DE  
3kW MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA**

**ANEXOS**

**Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico,**

**que presenta el bachiller:**

**Daniel Lavayen Farfán**

**ASESORES:**

**Ing. Herbert Yépez Castillo  
Dr. Rosendo Franco Rodriguez**

**Lima, Noviembre de 2014**

## ANEXOS

## ANEXO 1. Datos generales del aerogenerador proporcionados por la empresa.

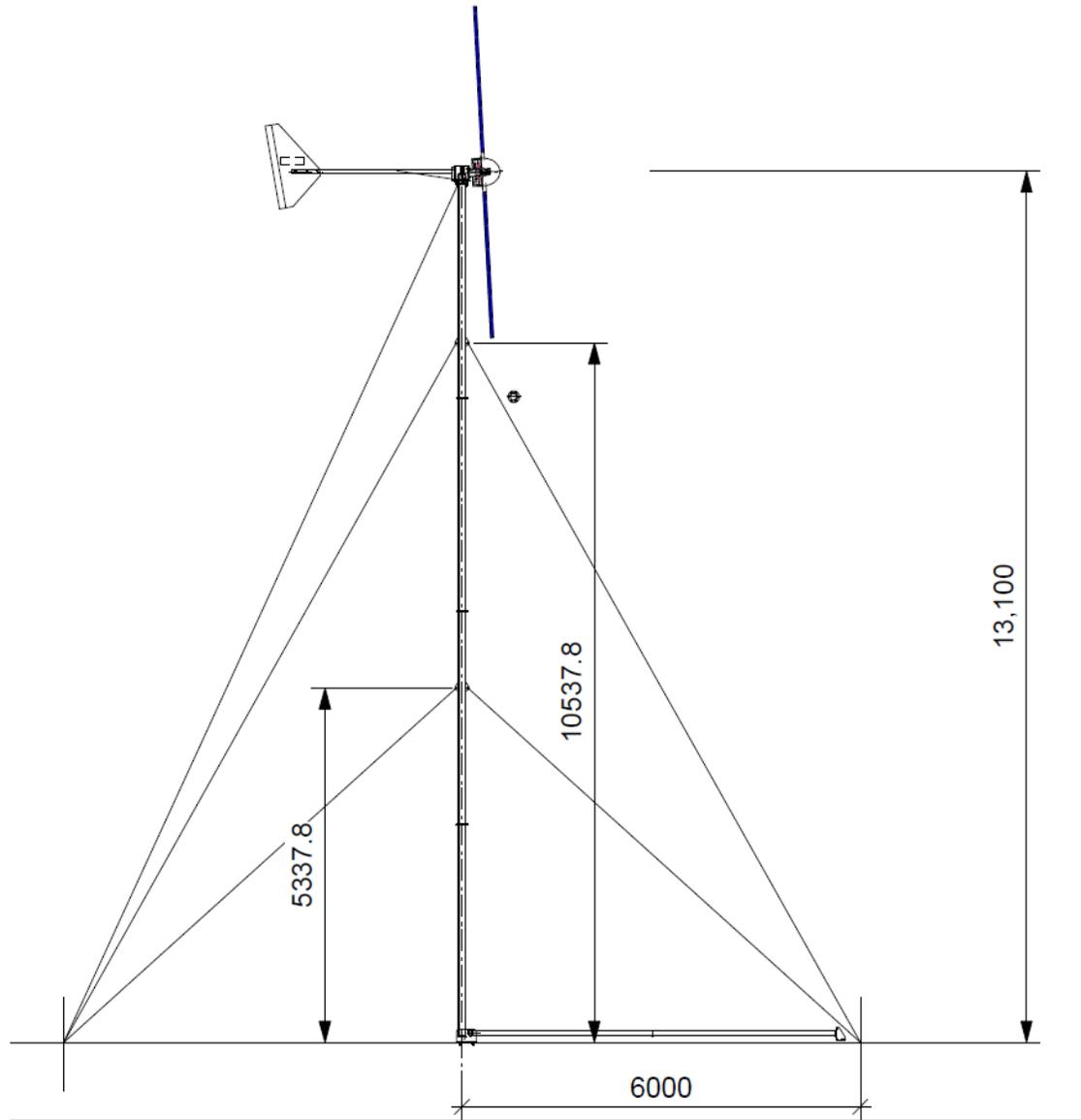
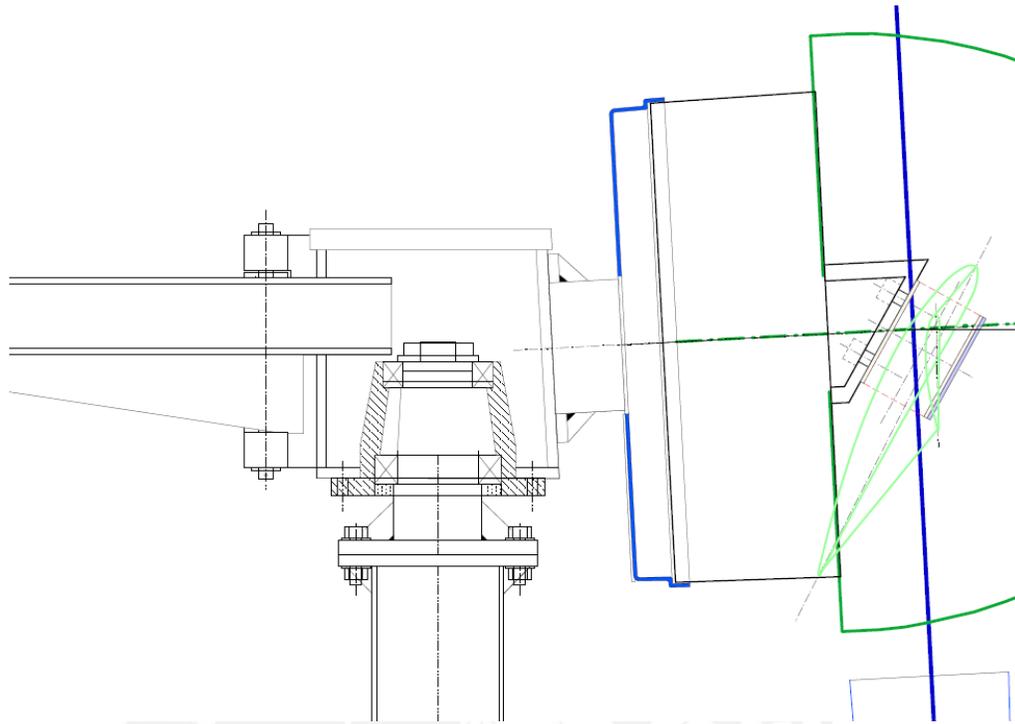
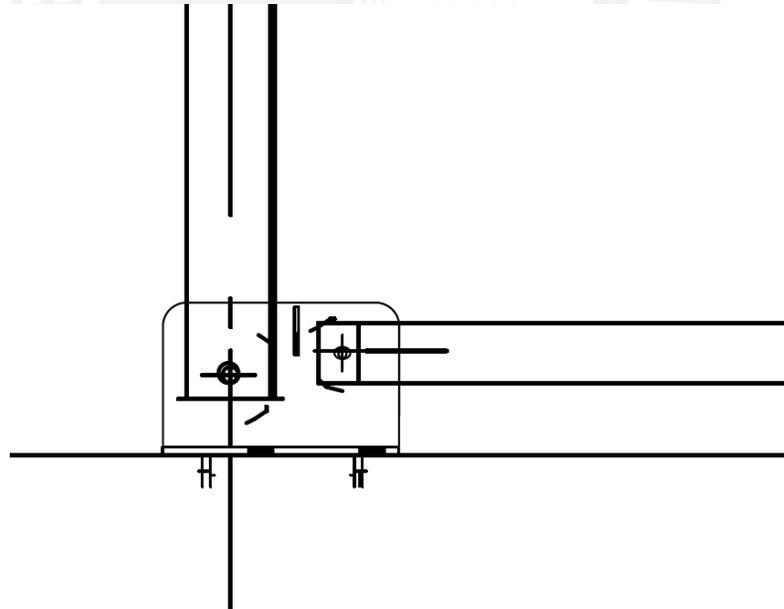


Figura A1.1. Esquema general del ensamble del aerogenerador



*Figura A1.2. Detalle del ensamble superior.*



*Figura A1.3. Detalle de la base del aerogenerador, mostrando la torre en posición vertical y la torre auxiliar en posición horizontal.*

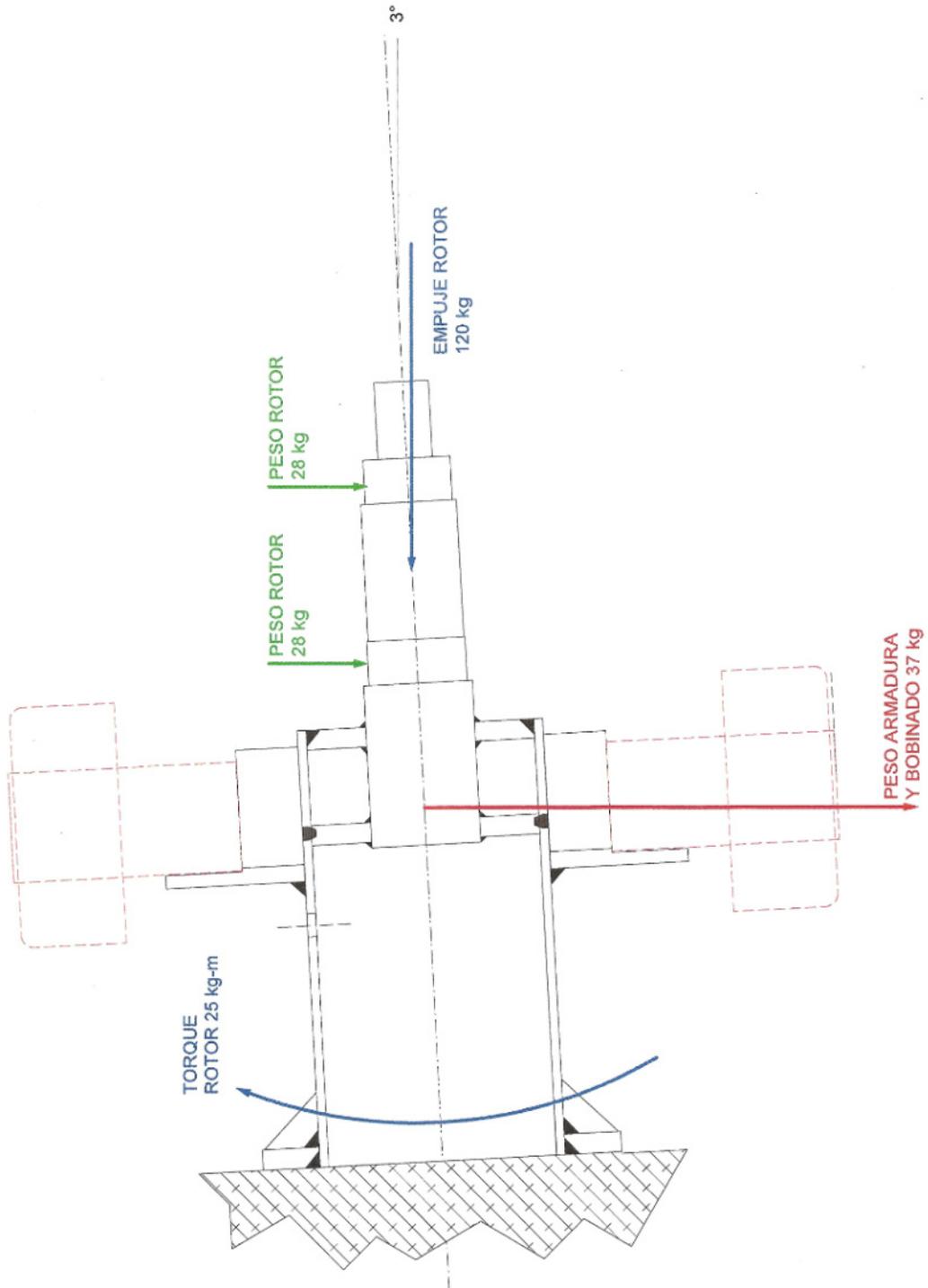


Figura A1.4. Esquema general de las cargas debidas al funcionamiento.

## ANEXO 2. Determinación de cargas sobre el aerogenerador, correspondientes a condiciones de funcionamiento extremo de 14 m/s y 400 RPM [19] [20]

Las cargas actuantes sobre la estructura por el funcionamiento del aerogenerador se obtuvieron gracias a un estudio previo sobre las palas del aerogenerador. Conjuntamente con la presente tesis, el estudio aerodinámico de las palas del aerogenerador son parte del proyecto en apoyo al sector rural. Los estudios aerodinámicos estuvieron a cargo de los estudiantes Renatto Yupa y Miguel Cortez. Dicho estudio se realizó mediante dinámica de fluidos computacional (CFD), con ayuda del software ANSYS CFX.

El proceso de simulación CFD es similar al de los elementos finitos, con la diferencia que la discretización se realiza sobre un volumen de control, en este caso del volumen de aire que rodea al aerogenerador como se muestra en la figura A2.1, obteniéndose como resultados las velocidades vectoriales y presiones de los elementos. Los resultados obtenidos luego son procesados y mostrados de manera similar al método de elementos finitos.

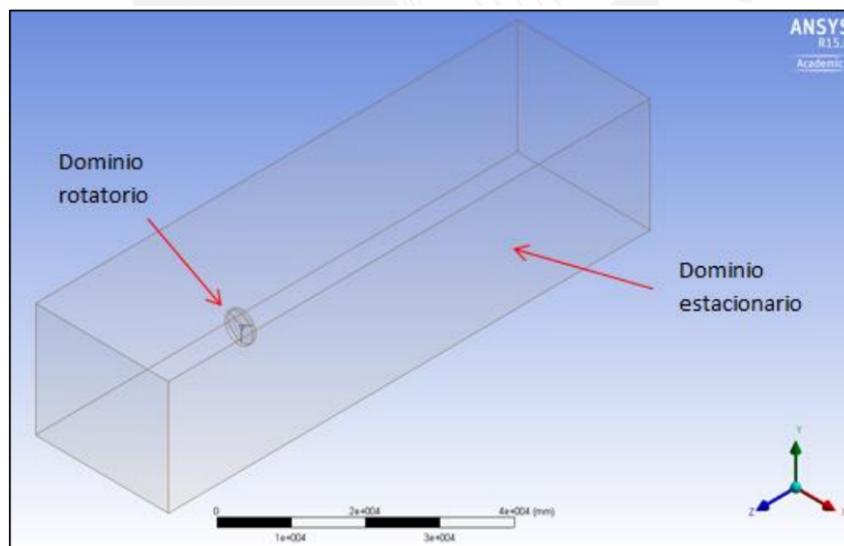


Figura A2.1. Definición del volumen de control, véase la diferencia de tamaño entre las palas y el volumen total considerado.

Posteriormente se procedió a realizar la discretización, dando énfasis en la obtención de una malla muy fina cerca a las palas, para poder capturar el perfil de velocidades de la capa límite, tal y como se aprecia en la figura A2.2.

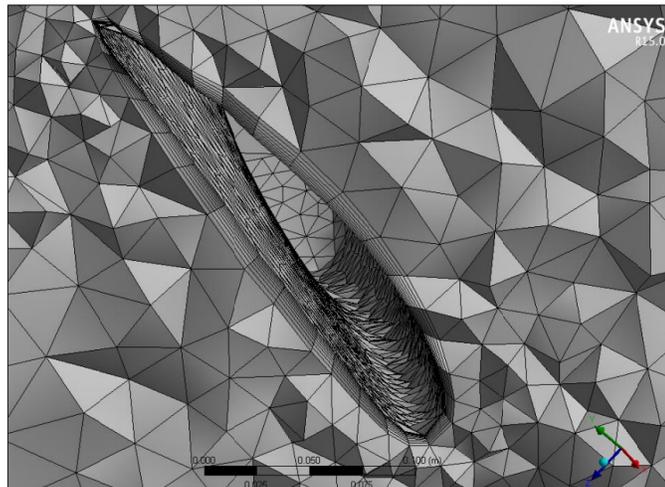


Figura A2.2. Detalle del refinamiento de la malla para la obtención de la capa límite.

En la figura A2.1 se puede apreciar la distribución de presiones sobre la pala del aerogenerador, que corresponden a una velocidad del viento de 14 m/s y una velocidad de rotación del rotor de 400 RPM.

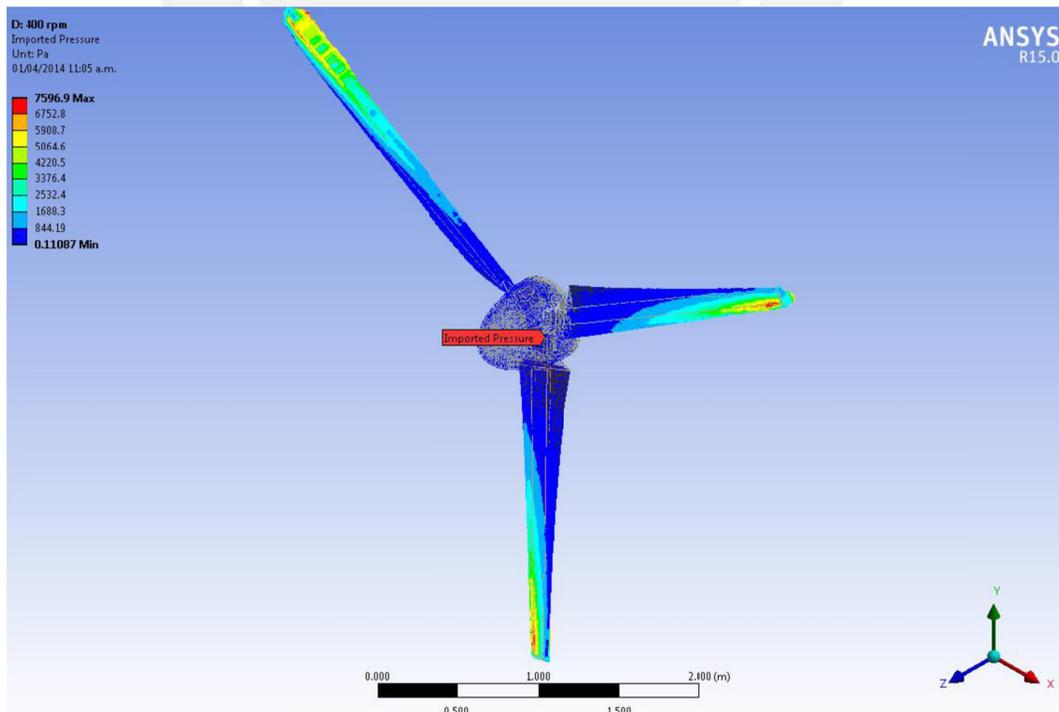


Figura A2.1. Campo de presiones sobre las palas del aerogenerador.

Así también se pudo perfilar las líneas de flujo del aire que pasa por las palas del aerogenerador en funcionamiento como se aprecia en la figura A2.2

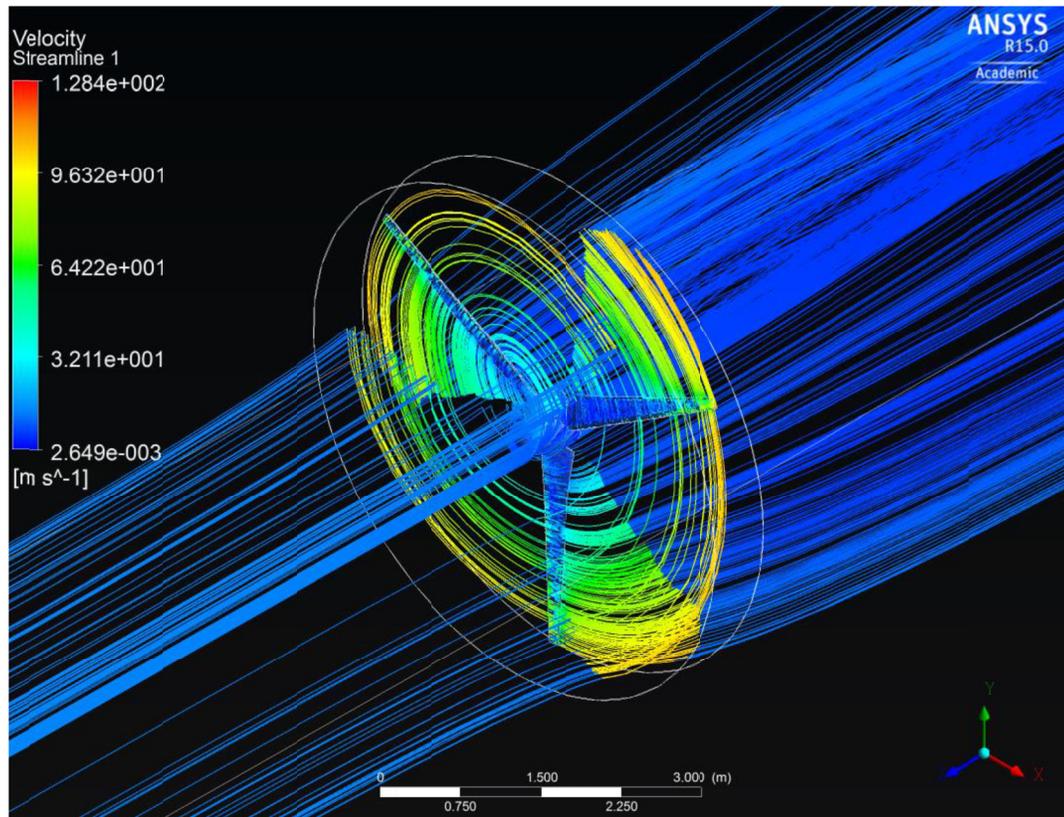


Figura A2.2. Líneas de flujo de aire en el aerogenerador.

Del ensayo anteriormente mostrado se lograron obtener las siguientes fuerzas y momentos resultantes, las cuales fueron usadas como cargas nominales para los análisis.

<b>Fuerza X (N)</b>	-1675
<b>Fuerza Y (N)</b>	-9.97
<b>Fuerza Z (N)</b>	3.34
<b>Momento X (Nm)</b>	273.96
<b>Momento Y (Nm)</b>	25.65
<b>Momento Z (Nm)</b>	-3.048

### ANEXO 3. Determinación de propiedades geométricas de los componentes estructurales.

#### Torre

La torre en general se considera como un tubo de sección transversal constante, la cual según datos proporcionados posee un diámetro exterior de 114 mm y un diámetro interior de 105mm.

$$d_{ext} = 114 \text{ mm} \quad , \quad d_{int} = 105 \text{ mm}$$

El área de la sección transversal:

$$A = \pi \frac{d_{ext}^2 - d_{int}^2}{4} = 1548.01 \text{ mm}^2$$

Momento de inercia de la sección transversal:

$$I_x = I_z = \pi \frac{d_{ext}^4 - d_{int}^4}{64} = 2324061.45 \text{ mm}^4$$

Radio de giro de la sección transversal:

$$i_x = i_z = \sqrt{\frac{I}{A}} = 38.747 \text{ mm}$$

**ANEXO 4. Propiedades mecánicas del acero estructural usado.**

El acero estructural usado tanto para los cálculos analíticos y las simulaciones se trata de un acero estructural equivalente al A36 con propiedades mostradas en la tabla A3.1.

<i>Tabla A3.1. Propiedades del acero estructural usado</i>	
Propiedad	Valor
Densidad	$7850 \frac{kg}{m^3}$
Resistencia a la fluencia en tracción	$250 MPa$
Resistencia a la fluencia en compresión	$250 MPa$
Resistencia última a tracción	$450 MPa$
Módulo de elasticidad	$2.1 \times 10^5 MPa = 210 GPa$
Módulo de Poisson	0.3



## ANEXO 5. Programa APDL para comportamiento de cables.

A continuación se muestra el programa para cambiar el tipo de elemento de los cables. A elementos LINK180 usados para simular cables.

```
/PREP7
```

```
!Definición de Propiedades
```

```
Y = 2.1e5
```

```
P = 0.3
```

```
D = 7800e-9
```

```
AREA = 3.14*2.38125*2.38125
```

```
!Definición de nuevo Elemento LINK 180
```

```
*GET, ETMAX, ETYP, 0, NUM, MAX
```

```
ETMAX = ETMAX + 1
```

```
ET, ETMAX, LINK180,,,1
```

```
SECTYPE,ETMAX,LINK
```

```
SECDATA, AREA
```

```
MP, EX, ETMAX, Y
```

```
MP, NUXY, ETMAX, P
```

```
MP, DENS, ETMAX, D
```

```
!Modificación de elementos existentes
```

```
CMSEL,S,Cables,
```

```
ESEL,R,ENAME,,BEAM188
```

```
EMODIF, ALL, TYPE, ETMAX
```

```
EMODIF, ALL, MAT, ETMAX
```

```
EMODIF,ALL, SECNUM,ETMAX
```

```
ALLS
```

```
FINISH
```

```
/SOLU
```

## ANEXO 6. Resultados gráficos de las simulaciones de la torre bajo distintas combinaciones de carga.

Al realizar las distintas simulaciones correspondientes a las diversas combinaciones de carga a las cuales está sometida la torre, se encontraron los siguientes resultados:

### A6.1 Resultados con combinación de carga – 1.4D

No se realizó la simulación de este caso debido a que se trata básicamente de una torre a compresión, la cual es más probable que falle por pandeo al ser un elemento esbelto, y como se vio con anterioridad, se necesita una fuerza casi 20 veces más grande para que existan problemas de estabilidad.

### A6.2 Resultados con combinación de carga – 1.2D + 1.6L

Esta combinación de carga resultó ser una de las más peligrosas ya que existen zonas donde se alcanza el valor del esfuerzo de fluencia del material (ver anexo 4) como se ve en la figura A6.1A, con valores de esfuerzos de hasta 351 MPa en la zona de unión de las orejas con la torre, la base de la torre no está sometida a grandes esfuerzos (figura A6.1B). Claramente se ve la gran influencia del empuje sobre las palas provocado por el viento.

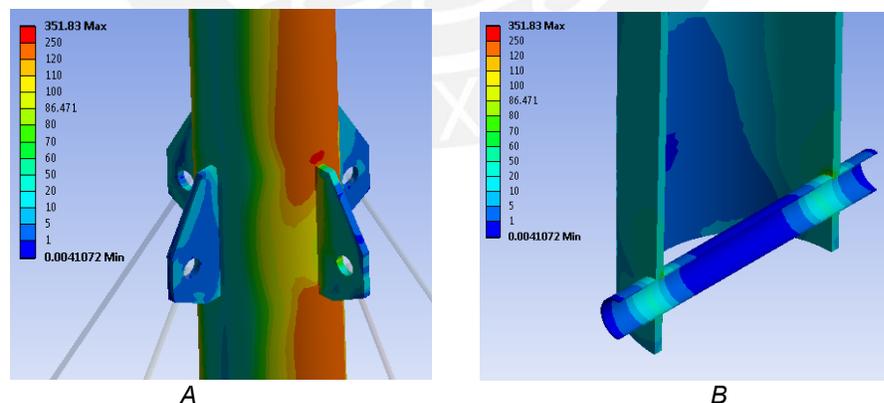


Figura A6.1. Distribución de esfuerzos para la combinación de cargas 1.2D + 1.6L, A) esfuerzos en la unión de las orejas superiores. B) Esfuerzos en la base. En MPa.

### A6.3 Resultados con combinación de carga – 1.2D + 0.8W

Como se aprecia en las figuras A6.2, se aprecian los esfuerzos en la torre al ser sometida solo a carga muerta y carga de viento sobre la torre. Como se aprecia, esta carga no posee un valor alto (por lo tanto no tiene una gran influencia), debido a que el área proyectada de la torre (para el cálculo de la fuerza de viento) es muy pequeña. En este caso los valores máximos encontrados son de 30 MPa en la base.

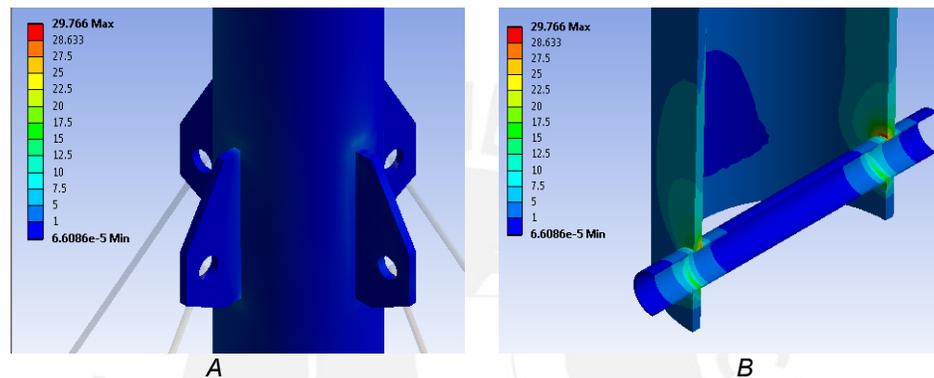


Figura A6.2. Distribución de esfuerzos para la combinación 1.2D + 0.8W, A) esfuerzos en la unión de las orejas superiores. B) Esfuerzos en la base. En MPa.

### A6.4 Resultados con combinación de carga – 1.2D + 1.6W + 0.5L

Este caso si bien cuenta con el doble de carga de viento sobre la torre, el empuje en las palas es la mitad del nominal, por lo tanto es esperable que el valor máximo del esfuerzo también este en ese orden (comparar con figura 3.18), lo cual se cumple como se observa en la figura A6.3 con un valor de esfuerzo máximo de 119 MPa.

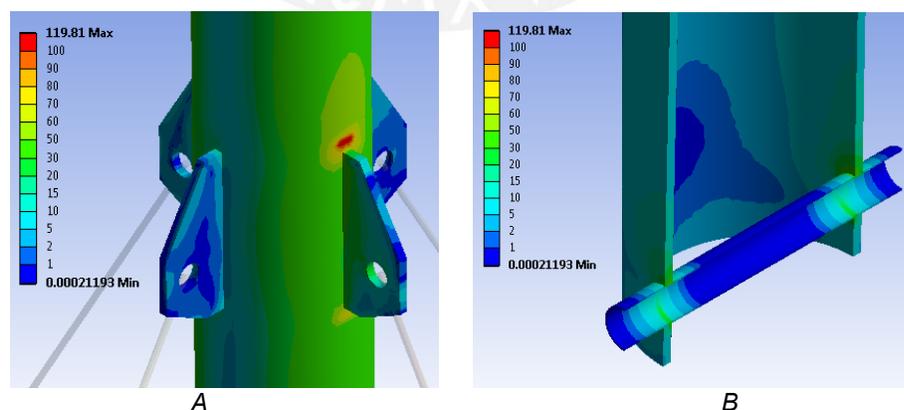


Figura A6.3. Distribución de esfuerzos para la combinación 1.2D + 1.6W + 0.5L, A) esfuerzos en la unión de las orejas superiores. B) Esfuerzos en la base. En MPa.

### A6.5 Resultados con combinación de carga – 1.2D + 1.0E + 0.5L

En esta simulación se consideró una cortante basal transversal a la dirección del viento, obteniéndose valores de hasta 180 MPa en la unión de las orejas con la torre como se aprecia en la figura A6.4. La carga con mayor influencia en este caso es la cortante basal

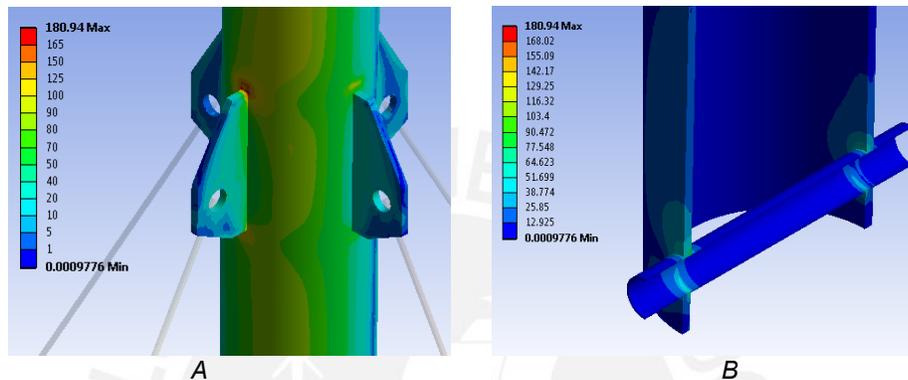


Figura A6.4. Distribución de esfuerzos para la combinación 1.2D + 1.0E + 0.5L, A) esfuerzos en la unión de las orejas superiores. B) Esfuerzos en la base. En MPa.

### A6.6 Resultados con combinación de carga – 0.9D + 1.0E

En esta simulación se obtuvieron resultados muy similares a los anteriores, debido a que la gran influencia la posee la cortante basal que, como en el caso anterior, es perpendicular al viento. Los valores máximos alcanzados son de 189 MPa como se ve en la figura A6.5 y se puede observar su semejanza con la figura A6.4.

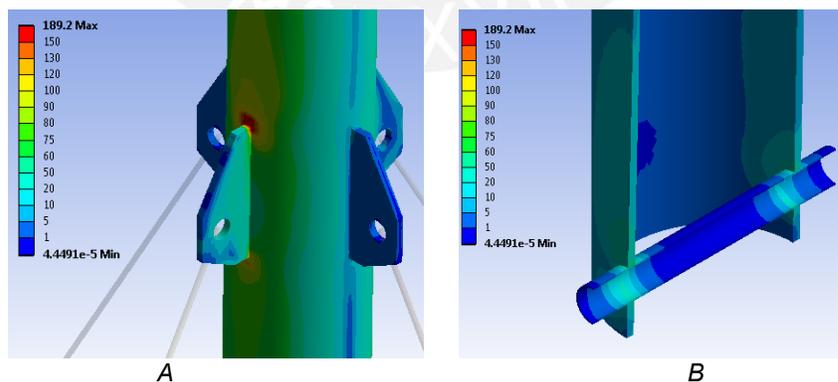


Figura A6.5. Distribución de esfuerzos para la combinación 0.9D + 1.0E, A) esfuerzos en la unión de las orejas superiores. B) Esfuerzos en la base. En MPa.

### A6.7 Resultados con combinación de carga – 0.9D + 1.6W

Esta simulación fue realizada con una combinación de cargas de las caules ninguna es crítica o tiene gran influencia en la torre, esto se evidencia en los esfuerzos hallados, con un máximo valor alcanzado de 28 MPa, como se muestra en la figura A6.6.

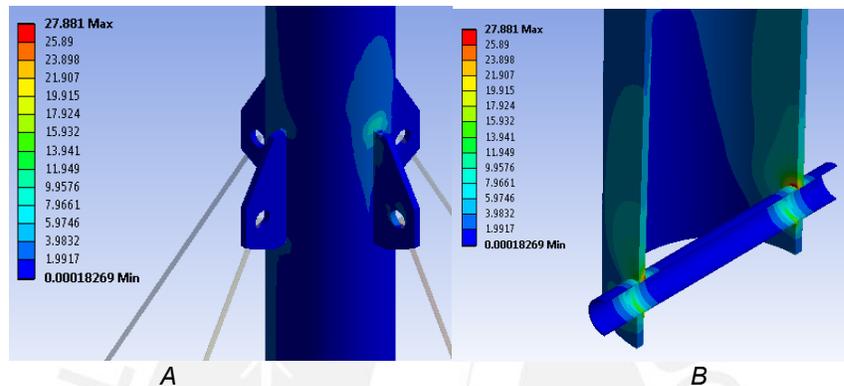


Figura A6.6. Distribución de esfuerzos para la combinación 0.9D + 1.6W, A) esfuerzos en la unión de las orejas superiores. B) Esfuerzos en la base. En MPa.