

# Análisis Estático y Dinámico de Dispositivo de Intercambio de Momento

## Static and Dynamic Analysis of Momentum Exchange Device

Karla D. Mieres, *Ingeniero de Diseño, ABAE*

**Resumen**—Un dispositivo de intercambio de momento, también denominado como rueda de momento, constituye el grupo de actuadores primarios encargados de ejecutar el control de orientación de un satélite, su diseño debe ser capaz de suministrar individualmente un momento angular para proveer rigidez giroscópica y torques de control, con el objeto de soportar perturbaciones externas o realizar maniobras de apuntamiento. Durante pruebas en tierra, dicho dispositivo puede desempeñarse sobre una plataforma de simulación denominada “Plataforma de Pruebas y Desarrollo de AOCS&UPS (Attitude and Orbit Control System & Unified Propulsion System)” de un medio sin fricción, la cual es empleada para realizar pruebas de control de orientación satelital y diseñada para desarrollar, mejorar y probar el funcionamiento de sensores, actuadores y algoritmos. Basado en el diseño de este dispositivo desarrollado bajo el software de diseño “Autodesk Inventor Professional”, se desarrolla el presente artículo, describiendo el análisis estático y dinámico del mismo, correspondiente a cuando está detenido (0 rpm) y/o girando a una velocidad angular entre 0.1 rpm a 10000 rpm, considerando inclinaciones de  $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 54.7^\circ$ , y  $\pm 90^\circ$ , describiendo además, características de la geometría, análisis, y mallado, propiedades mecánicas del material, propiedades de masa de la geometría, resultados de análisis de desplazamiento total, tensión equivalente, fatiga, y modal. Dicho análisis es desarrollado bajo el software de análisis “Ansys Workbench”, el cual ayuda a verificar u obtener el diseño más adecuado para su manufactura, ensamblaje, y funcionamiento, incrementando así la cantidad y calidad de experimentos desarrollados en tierra.

**Palabras claves**—Análisis, Diseño, Rueda de Momento, Satélite.

**Abstract**—A moment exchange device, also called moment wheel, is the group of primary actuators responsible for executing the orientation control of a satellite, its design must be able to individually supply an angular momentum to provide gyroscopic rigidity and control torques, in order to withstand external disturbances or perform pointing maneuvers. During ground testing, such a device can be performed on a simulation platform called "AOCS & UPS (Attitude and Orbit Control System & Unified Propulsion System) Test and Development Platform" of a frictionless medium, which is used to perform control tests

oriented and designed to develop, improve and test the operation of sensors, actuators and algorithms. Based on the design of this device developed under the design software "Autodesk Inventor Professional", this article is developed, describing the static and dynamic analysis of the same, corresponding to when stopped (0 rpm) and/or rotating at an angular velocity between 0.1 rpm and 10000 rpm, considering inclinations of  $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 54.7^\circ$ , and  $\pm 90^\circ$ , further describing, characteristics of the geometry, analysis, and meshing, mechanical properties of the material, geometry, analysis results of total displacement, equivalent stress, fatigue, and modal. This analysis is developed under the analysis software "Ansys Workbench", which helps to verify or obtain the most suitable design for its manufacture, assembly and operation, increasing the quantity and quality of experiments developed on the ground.

**Index Terms**—Analysis, Design, Momentum Wheel, Satellite.

### I. INTRODUCCIÓN

EL control de orientación de un satélite es obtenido por medio del funcionamiento de diferentes actuadores alojados en dicha nave, uno de ellos es denominado como rueda de momento, empleada para cambiar el momento angular sin consumir combustible y con el objeto soportar perturbaciones externas y/o realizar maniobras de apuntamiento, para ello, cada rueda debe constar de un motor eléctrico, el cual produce un movimiento giratorio, en este sentido y debido a la conservación del momento angular, la nave gira de forma proporcional en dirección opuesta a la rotación del motor.

Cabe destacar que este tipo de rueda sólo permite la rotación de la nave alrededor de su centro de masa, es decir, en ningún caso genera un movimiento de traslación y se implementan generalmente como motores eléctricos espaciales, montadas a lo largo de los ejes X, Y, y Z. Debido a que estas representan una pequeña fracción de la masa total de la nave, cambios fácilmente medibles en su velocidad proporcionan una transformación muy precisa en su ángulo, por lo tanto, permiten realizar cambios precisos en la actitud de un satélite o nave.

Fecha de presentación para revisión 25 de agosto de 2017. El presente trabajo fue apoyado en parte por el subsistema de Control y Posición Orbital (AOCS&UPS) y el subsistema de Estructuras y Mecanismos (E&M).

K. D. Mieres. Ingeniero Mecánico, Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada (U.N.E.F.A), Puerto Cabello, Edo. Carabobo, Venezuela.

Actualmente investigador de la Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales (ABAE), Centro de Investigación y Desarrollo Espacial (CIDE), Borburata, Puerto Cabello, Edo. Carabobo, Venezuela. (e-mail: kmieres@abae.gob.ve/kraornliae@gmail.com).

Por esta razón, las ruedas de momento son empleadas a menudo para orientar principalmente naves portadoras de cámaras o telescopios como carga útil. Para incrementar conocimientos y aplicaciones de las ruedas de momento y su vez la cantidad y calidad de experimentos desarrollados en tierra, es importante llevar a cabo su diseño y fabricación y posteriormente ser probados sobre una plataforma de simulación denominada “Plataforma de Pruebas y Desarrollo de AOCS&UPS (Attitude and Orbit Control System & Unified Propulsion System)” de un medio sin fricción, la cual es empleada para realizar pruebas de control de orientación satelital y diseñada para desarrollar, mejorar, y probar el funcionamiento de sensores, actuadores, y algoritmos.

Para llevar a cabo la fabricación de estas ruedas, es importante disponer de un diseño óptimo, por ello, a partir de un diseño preliminar, se desarrolla los análisis respectivos con el fin de conocer su comportamiento en diferentes condiciones de trabajo, siendo este el objeto del presente artículo, y de ser necesario, ejecutar el mejoramiento en el diseño del mismo. En base al diseño de una rueda de momento, bajo la utilización del software de diseño “Autodesk Inventor Professional”, se lleva a cabo el análisis estático y dinámico de la misma, empleando el software de análisis “Ansys Workbench”, esta será sometida a diferentes grados de inclinación ( $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 54.7^\circ$ , y  $\pm 90^\circ$ ) y rangos de velocidad correspondiente a cuando estén detenidas (0 rpm) y/o girando a una velocidad angular entre 0.1 rpm a 10000 rpm (haciendo énfasis en 2000 rpm y 8050 rpm).

Durante el desarrollo de la presente investigación, se observa los requerimientos técnicos, características de la geometría, análisis, y mallado, propiedades mecánicas del material y propiedades de masa. Como resultado, se describe el análisis de desplazamiento total, tensión equivalente, fatiga, y modal.

## II. RUEDA DE MOMENTO

Es un dispositivo de intercambio de momento diseñado para proveer control de orientación de un satélite con respecto a un sistema de referencia; gira a alta velocidad creando estabilidad a la nave, lo que es resistente a los cambios de orientación, asegura precisión de apuntamiento en modo normal durante la toma de imágenes y realiza maniobras de giro.

## III. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

### A. Requerimientos Generales

- La rueda de momento debe generar momento angular para obtener rigidez giroscópica en la plataforma de pruebas y desarrollo de AOCS&UPS, con el objeto de eliminar las perturbaciones causadas por factores externos y/o realizar apuntamiento inercial [1].
- Se debe obtener un momento angular igual a cero mediante el desempeño absoluto de cuatro ruedas [1].
- La rueda de momento debe suministrar un torque de control adecuado para realizar maniobras de rotación a la velocidad angular requerida, sobreponerse en un tiempo adecuado de una perturbación externa inesperada y alcanzar la actitud nominal o error cero en actitud [1].

### B. Requerimientos de Desempeño

#### 1) Requerimientos de AOCS

- La rueda de momento debe poseer un momento de inercia a lo largo de su eje de rotación mayor a  $2.0 \times 10^{-3} kg.m^2$  (para una velocidad angular nominal de 2000 rpm) [1].

#### 2) Requerimientos de Diseño y Configuración

- La rueda de momento debe poseer un diseño óptimo, logrando el momento de inercia requerido con la menor cantidad de masa posible [1].
- El material empleado para la fabricación de la rueda de momento debe ser aleación de aluminio Al 6061 T6 [1].

#### 3) Requerimientos de Masa

- Masa de la rueda de momento:  $\leq 0.5$  Kg [1].

#### 4) Requerimientos del Motor

- Motor seleccionado para cumplir con los requerimientos anteriores es el Maxon DC RE30-310007 [1].

#### 5) Requerimientos de Cargas

- La carga máxima axial del motor es 5.6 N [2].
- La carga máxima radial del motor 28 N [2].

#### 6) Requerimientos de Proceso de Análisis

- Realizar análisis estático y dinámico de la rueda de momento en un rango de frecuencias correspondiente a cuando esta esté detenidas (0 rpm) y/o girando a una velocidad angular entre 0.1 rpm a 10000 rpm (haciendo énfasis en las 2000 rpm y 8050 rpm) [1].
- Analizar los esfuerzos y deformaciones de la rueda de momento, teniendo en cuenta el rango de torques entregados por el motor 3 mNm a 1020 mNm (haciendo énfasis en los 3 mNm y los 85 mNm). Además, la componente del peso para esfuerzos y deformaciones debe ser considerado con una inclinación de  $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 54.7^\circ$ , y  $\pm 90^\circ$  con respecto a los ejes de referencia [1].

#### 7) Factor de Seguridad

- Se debe usar un factor de seguridad de 1.5 [1].

## IV. INTERFACES

### A. Motor

- Motor Maxon DC RE30 – 310007 [1].
- Cada motor provee un eje de 5 mm  $\times$  16.75 mm [2].
- La dimensión total de cada motor es de 30 mm  $\times$  88 mm (incluyendo encoder) [2] [3].
- Cada motor provee una velocidad nominal de 8050 rpm [2].
- Cada rueda de momento debe contener una cavidad central axial para insertar el eje del motor y una cavidad radial para fijar el eje del motor con la MW por medio de un tornillo prisionero o de fijación M3 [1].

### B. Eléctrica

- Cada motor suministra un voltaje nominal de 24.0 V [2].

### C. Térmica

- La temperatura de trabajo el sistema será entre  $14^\circ C$  y  $30^\circ C$  [1].

V. DISEÑO DETALLADO

La rueda de momento es diseñada en forma de cilindro con un diámetro de 156 mm y un espesor de 37 mm, siendo esta la geometría adecuada para llevar a cabo el cumplimiento de los requerimientos. Este dispositivo es diseñado mediante el software de diseño CAD “Autodesk Inventor Professional”, creando así un modelo 3D, incorporando material de aluminio Al 6061 T6 como material para su fabricación. El modelo mecánico 3D de la rueda de momento se adopta como base para el modelo de análisis de elemento finito (FEM), en el cual se obtendrán los resultados de análisis estático y dinámico de la misma. Los parámetros de diseño de la rueda de momento se resumen en la TABLA I mostrada a continuación.

TABLA I  
PARÁMETROS DE DISEÑO DE LA RUEDA DE MOMENTO [4]

No.	Código del Componente	Descripción	Dimensiones (mm)
1	SE-MW-XYZS-001	Rueda de Momento	$\varnothing = 156$ ; $e = 37$

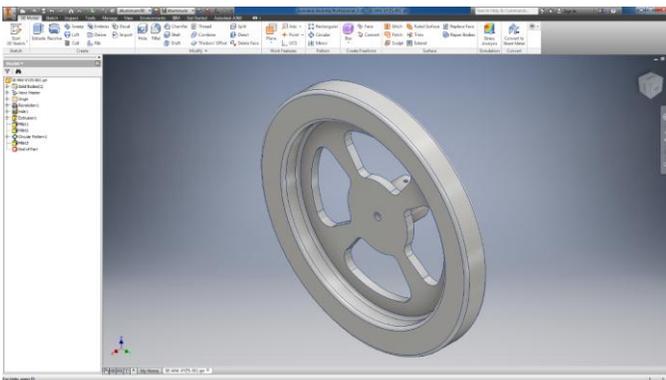


Fig. 1. Modelo de Diseño 3D - Rueda de Momento (1) [4]

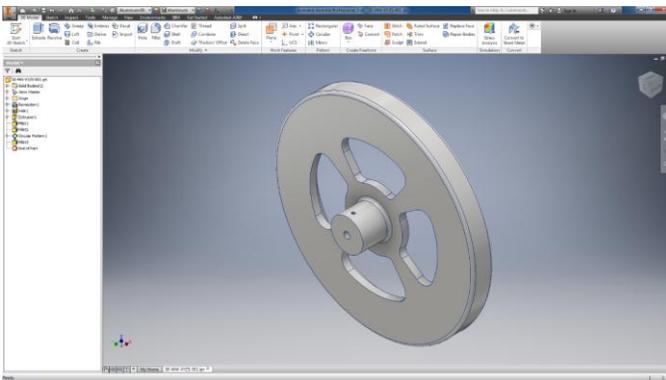


Fig. 2. Modelo de Diseño 3D – Rueda de Momento (2) [4]

VI. ANÁLISIS DEL MODELO

El FEM de la rueda de momento es realizado considerando los requerimientos de proceso de análisis descritos anteriormente. Con el empleo de este modelo, se realiza el análisis estático y dinámico, el cual es construido empleando un software de análisis “Ansys Workbench R17.2 Academic”. De acuerdo a los requerimientos de proceso de análisis, la rueda de momento debe contener diferentes ángulos de inclinación, los cuales son descritos a continuación desde la Fig. 3 hasta la Fig. 9.

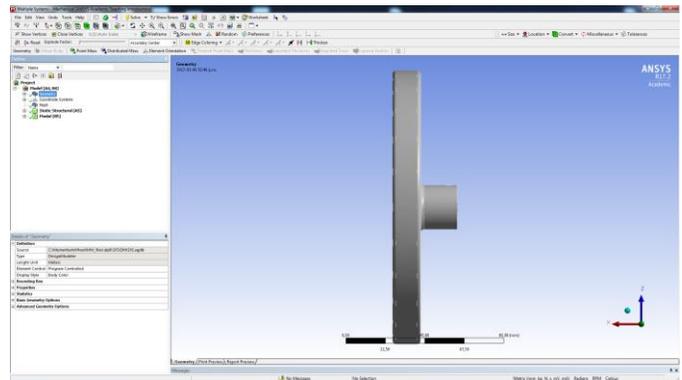


Fig. 3. Geometría 0°

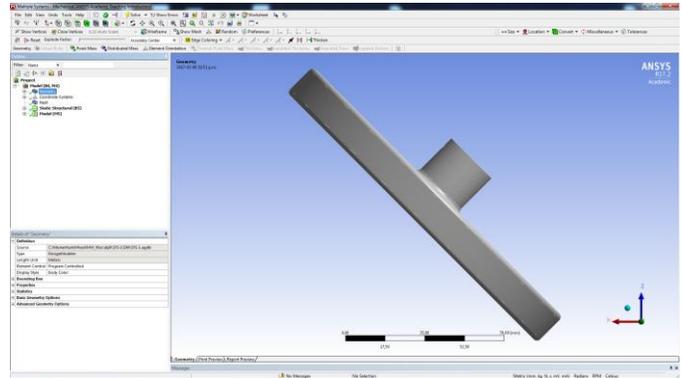


Fig. 4. Geometría +45°

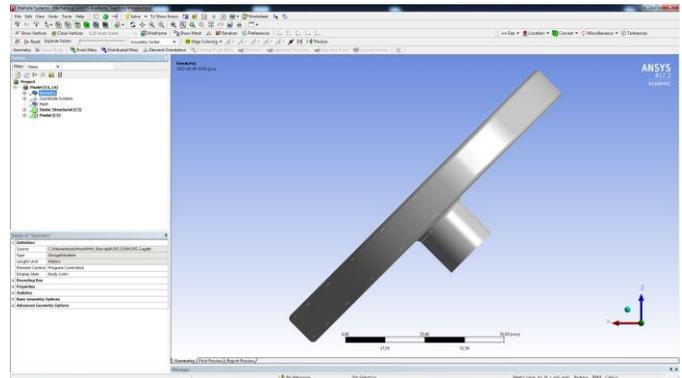


Fig. 5 Geometría -45°

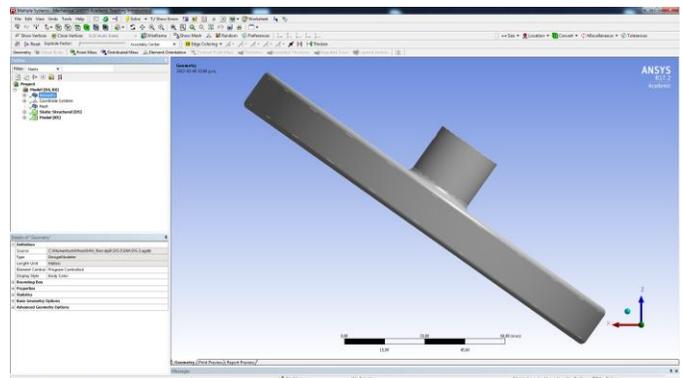


Fig. 6. Geometría +54.7°

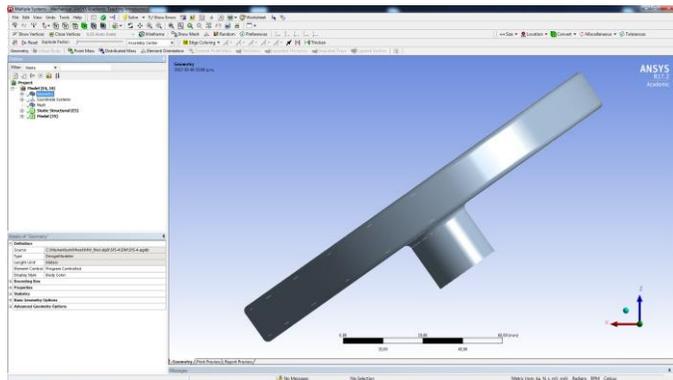


Fig. 7. Geometría -54.7°

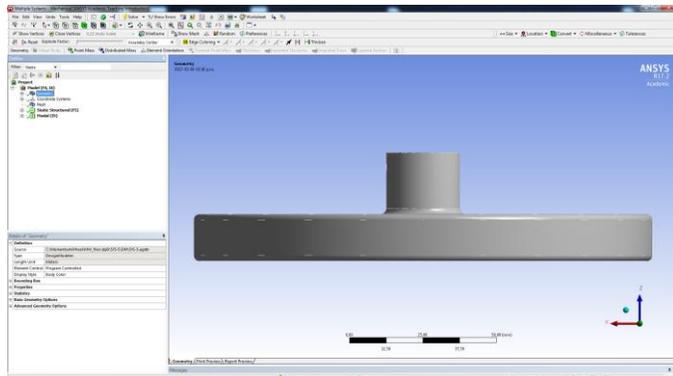


Fig. 8. Geometría +90°

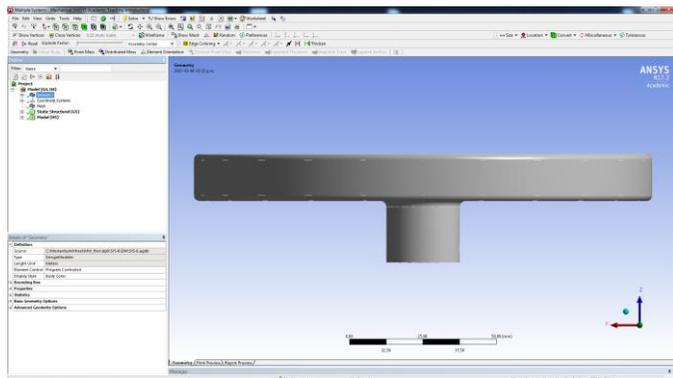


Fig. 9. Geometría -90°

**A. Características de Análisis**

- Modelo de tres ejes
- Masa de rueda de momento M=0.452 kg.
- Número de nodos:
  - Rueda de Momento 0°: 6604
  - Rueda de Momento +45°: 6862
  - Rueda de Momento -45°: 6779
  - Rueda de Momento +54.7°: 6792
  - Rueda de Momento -54.7°: 6734
  - Rueda de Momento +90°: 6749
  - Rueda de Momento -90°: 6743
- Número de elementos:
  - Rueda de Momento 0°: 3446
  - Rueda de Momento +45°: 3651
  - Rueda de Momento -45°: 3582
  - Rueda de Momento +54.7°: 3587

- Rueda de Momento -54.7°: 3543
- Rueda de Momento +90°: 3546
- Rueda de Momento -90°: 3545

**B. Características de Mallado**

TABLA II  
CARACTERÍSTICAS DEL MALLADO

Predeterminado	
Propiedad física	Mecánica
Relevancia	0
Control de forma	Mecánica estándar
Elementos de nodo intermedio	Programa controlado
Tamaño	
Función tamaño	Adaptado
Centro de relevancia	Grueso
Tamaño del elemento	Predeterminado
Tamaño inicial	Ensamblaje activo
Suavizado	Medio
Transición	Rápido
Centro de ángulo de separación	Grueso
Degradación automática basada en malla	Encendido
Tamaño de degradación	Predeterminado
Longitud mínima del borde	5.0 mm
Inflación	
Utilizar inflación automática	Ninguna
Opción de inflación	Transición suave
Proporción de transición	0.272
Máximo de capas	5
Tasa de crecimiento	1.2
Algoritmo de inflación	Pre
Ver opciones avanzadas	No
Avanzado	
Número de CPUs para el mallado de piezas paralelas	Programa controlado
Elementos rectangulares	No
Número de intentos	Predeterminado (4)
Comportamiento rígido del cuerpo	Dimensionalmente reducido
Malla Morphing	Inhabilitado
Malla de superficie triangular	Programa controlado
Control de topología	Si
Tolerancia Pinch	Definir
Generar Pinch en actualización	No

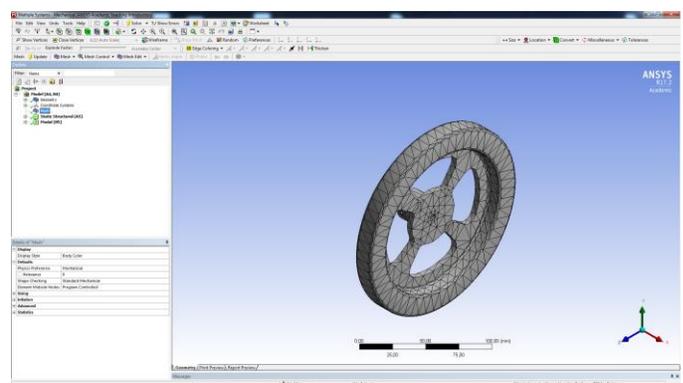


Fig. 10. Características de Mallado

### C. Propiedades Mecánicas del Material

Las propiedades mecánicas del material empleadas para el diseño y fabricación de la rueda de momento, se describe en la TABLA III.

TABLA III  
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL

Material	Densidad ( $kg \cdot mm^{-3}$ )	Resistencia a la tracción máxima (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Modulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson
Al 6061 T6	2.7126e-6	309.99	275.03	68899	0.33

### D. Propiedades de Masa

La masa total resultante de la rueda de momento es 0.452 kg. La ubicación del C.O.G y momento de inercia en C.O.G para cada una de las inclinaciones se describen en TABLA IV.

TABLA IV  
PROPIEDADES DE MASA DE RUEDA DE MOMENTO

	0°	+45°	-45°	+54.7°	-54.7°	+90°	-90°
Masa (kg)	0.45278						
CoG X (mm)	5.8037	4.1052	4.1013	3.3522	3.3556	2.0546E-003	2.0546E-003
CoG Y (mm)	1.3349E-007	5.8634E-003	5.0814E-003	7.4997E-008	2.2035E-007	1.3349E-007	1.3349E-007
CoG Z (mm)	2.0546E-003	4.1024	4.1059	-4.738	4.7357	5.8037	5.8037
Mol XX ( $kg \cdot mm^2$ )	1802.	917.33	1799.	917.38	917.38	918.81	918.81
Mol YY ( $kg \cdot mm^2$ )	918.8	917.35	917.34	917.37	917.36	918.8	918.8
Mol ZZ ( $kg \cdot mm^2$ )	918.81	1799.1	917.3	1799.2	1799.1	1802.	1802.

### VII. ANÁLISIS ESTÁTICO Y DINÁMICO

El análisis estático y dinámico se desempeña para obtener los resultados de desplazamiento total, tensión equivalente, fatiga, y modal de la rueda de momento en determinadas condiciones. Este análisis es desarrollado en doce (12) etapas de cálculo como se describe en la TABLA V. En cada etapa se obtiene resultados asociados a las condiciones de gravedad, velocidad rotacional y torque descritos en las TABLA VI, TABLA VII, TABLA VIII respectivamente.

TABLA V  
ETAPAS ESPECÍFICAS DE CÁLCULO

Etapa	Etapa y Tiempo	Etapa	Etapa y Tiempo
1	1. s	7	7. s
2	2. s	8	8. s
3	3. s	9	9. s
4	4. s	10	10. s
5	5. s	11	11. s
6	6. s	12	12. s

TABLA VI  
GRAVEDAD ESTÁNDAR

Sistema de Coordenadas	Sistema de Coordenadas Global
Componente X	0 $mm/s^2$
Componente Y	0 $mm/s^2$
Componente Z	-9806.6 $mm/s^2$
Dirección	-Z

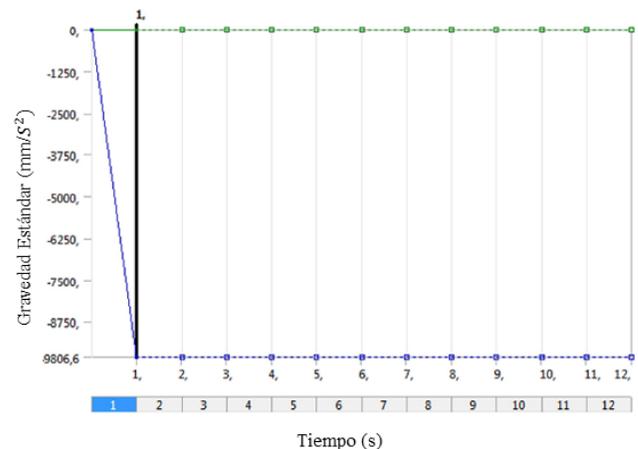


Fig. 11. Gravedad Estándar

TABLA VII  
VELOCIDAD ROTACIONAL

Etapa	Tiempo (s)	Velocidad Rotacional (rpm)
	0	0
1	1	0.1
2	2	1000
3	3	2000
4	4	3000
5	5	4000
6	6	5000
7	7	6000
8	8	7000
9	9	8000
10	10	8050
11	11	90000
12	12	10000

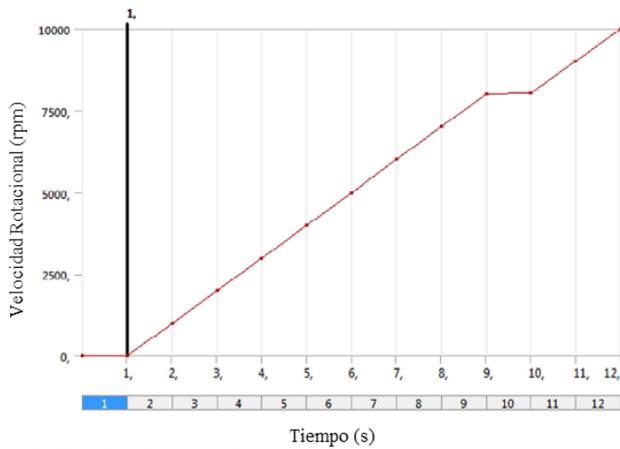


Fig. 12. Velocidad Rotacional

TABLA VIII  
TORQUE

Etapas	Tiempo (s)	Torque (N.mm)
1	0	0
1	1	3
2	2	85
3	3	200
4	4	300
5	5	400
6	6	500
7	7	600
8	8	700
9	9	800
10	10	900
11	11	1000
12	12	1020

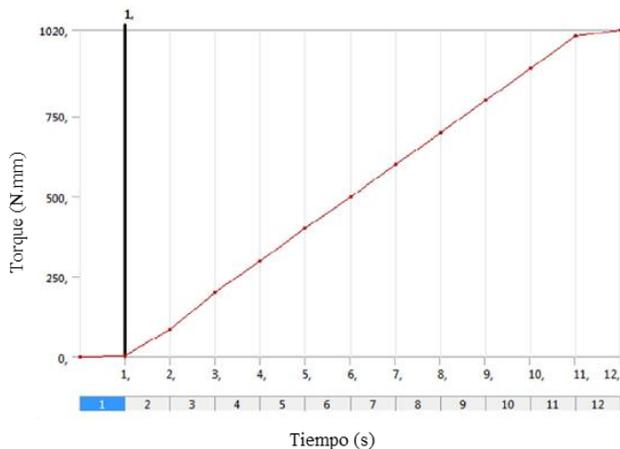


Fig. 13. Torque

A. Resultado de Análisis de Desplazamiento Total

De acuerdo a los requerimientos y parámetros definidos anteriormente, en la TABLA IX se describe para cada grado de inclinación de la rueda de momento y para cada tiempo/etapa de cálculo, los resultados de análisis de desplazamiento total máximos, los cuales representan los valores más críticos en dicho análisis.

TABLA IX  
DESPLAZAMIENTO TOTAL MÁXIMO (MM)

Inclinación /Tiempo (s)	0°	+45°	-45°	+54.7°	-54.7°	+90°	-90°
1	3.79 45E-04	7.20 18E-04	7.09 93E-04	7.4446 E-04	7.224 5E-04	6.44 12E-04	6.50 33E-04
2	7.42 60E-04	4.18 81E-04	1.06 39E-03	4.5433 E-04	1.076 5E-03	4.33 73E-04	9.98 49E-04
3	1.84 42E-03	1.33 56E-03	2.15 33E-03	1.2448 E-03	2.169 3E-03	9.42 15E-04	2.09 23E-03
4	3.68 23E-03	3.16 93E-03	3.98 40E-03	3.0880 E-03	4.007 4E-03	2.77 36E-03	3.93 77E-03
5	6.25 46E-03	5.73 92E-03	6.55 07E-03	5.6740 E-03	6.585 0E-03	5.36 68E-03	6.52 63E-03
6	9.55 95E-03	9.04 16E-03	9.85 00E-03	8.9973 E-03	9.898 3E-03	8.70 28E-03	9.85 36E-03
7	1.35 95E-02	1.30 74E-02	1.38 79E-02	1.3055 E-02	1.394 4E-02	1.27 78E-02	1.39 16E-02
8	1.83 57E-02	1.78 33E-02	1.86 35E-02	1.7843 E-02	1.872 0E-02	1.75 87E-02	1.87 10E-02
9	2.38 45E-02	2.33 17E-02	2.41 15E-02	2.3360 E-02	2.422 2E-02	2.31 24E-02	2.42 32E-02
10	2.41 34E-02	2.36 06E-02	2.44 03E-02	2.3649 E-02	2.451 1E-02	2.34 14E-02	2.45 21E-02
11	3.00 53E-02	2.95 21E-02	3.03 14E-02	2.9599 E-02	3.044 6E-02	2.93 86E-02	3.04 77E-02
12	3.69 79E-02	3.64 42E-02	3.72 30E-02	3.6559 E-02	3.741 4E-02	3.63 68E-02	3.74 41E-02

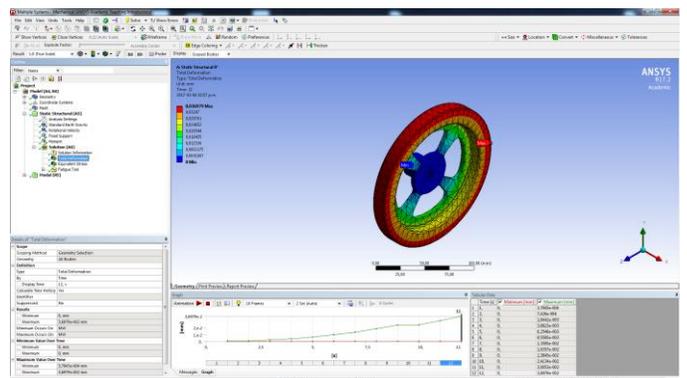


Fig. 14. Desplazamiento Total 0°

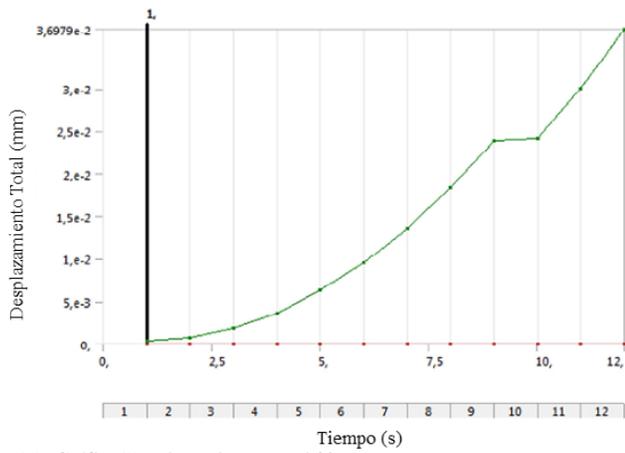


Fig. 15. Gráfica Desplazamiento Total 0°

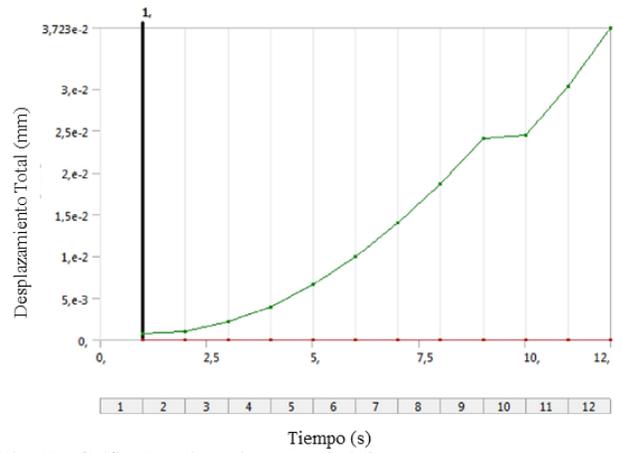


Fig. 19. Gráfica Desplazamiento Total -45°

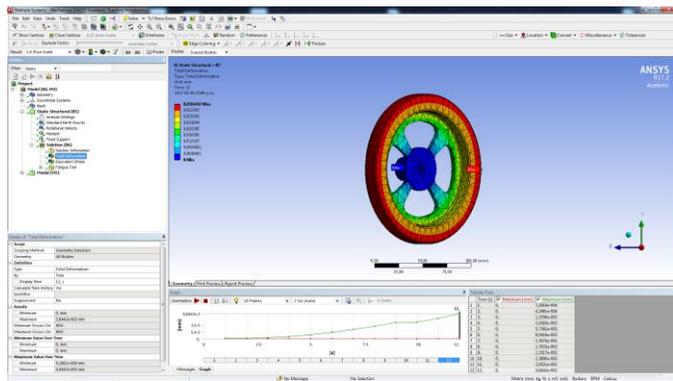


Fig. 16. Desplazamiento Total +45°

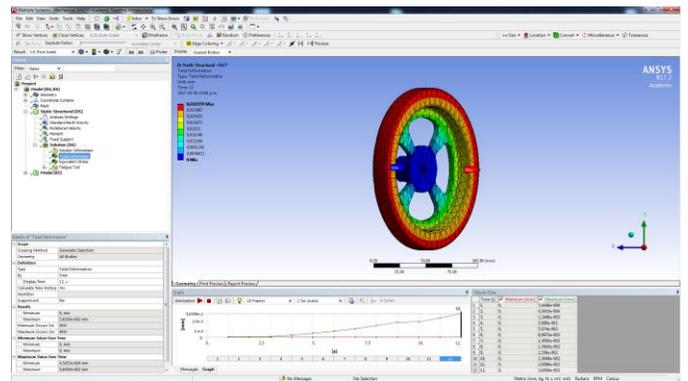


Fig. 20. Desplazamiento Total +54.7°

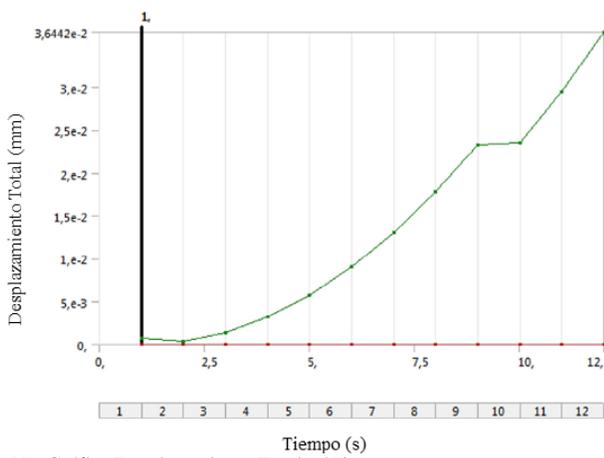


Fig. 17. Gráfica Desplazamiento Total +45°

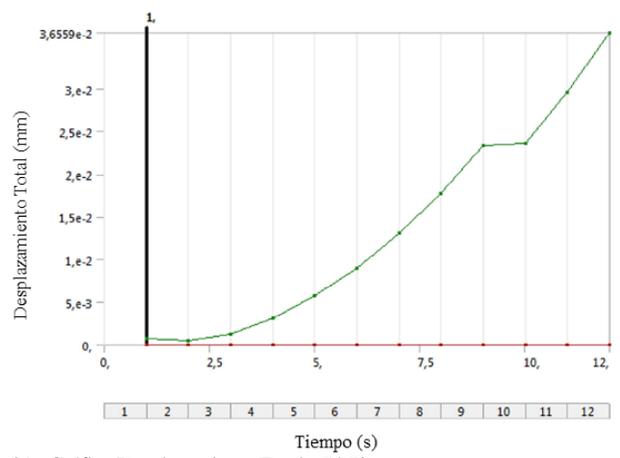


Fig. 21. Gráfica Desplazamiento Total +54.7°

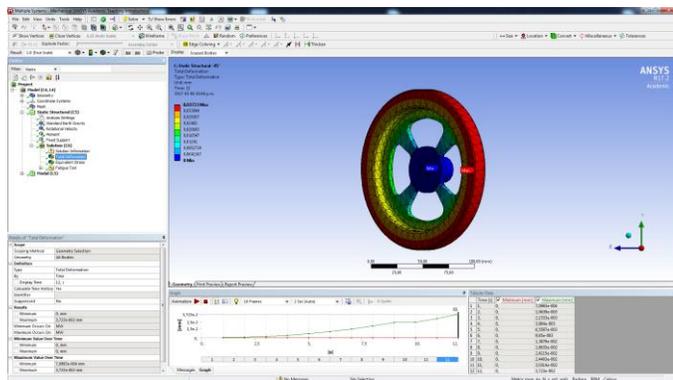


Fig. 18. Desplazamiento Total -45°

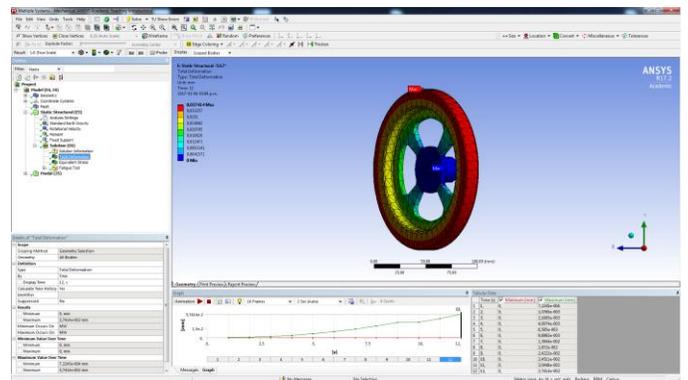


Fig. 22. Desplazamiento Total -54.7°

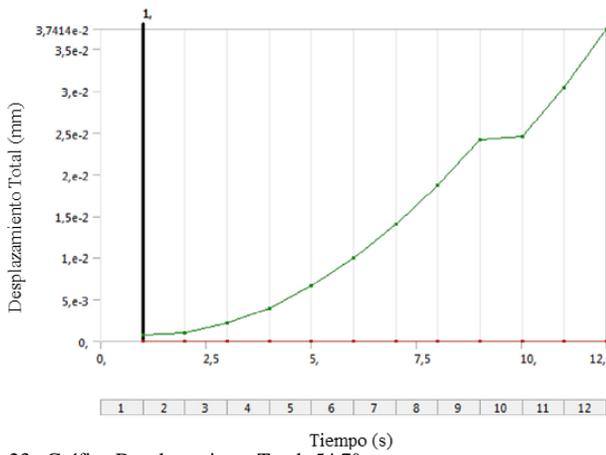


Fig. 23. Gráfica Desplazamiento Total -54.7°

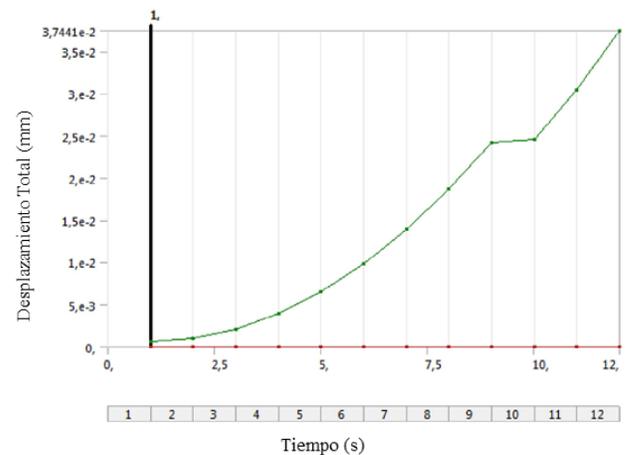


Fig. 27. Gráfica Desplazamiento Total -90°

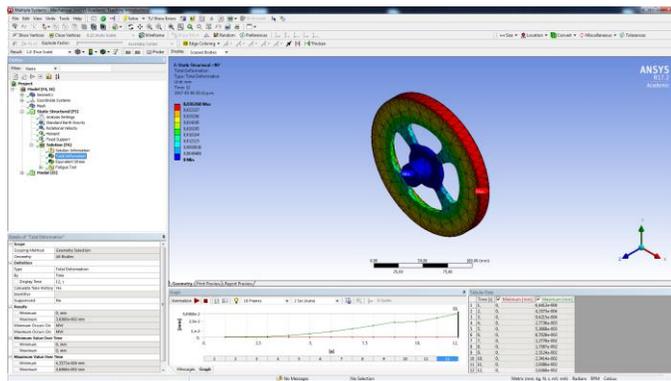


Fig. 24. Desplazamiento Total +90°

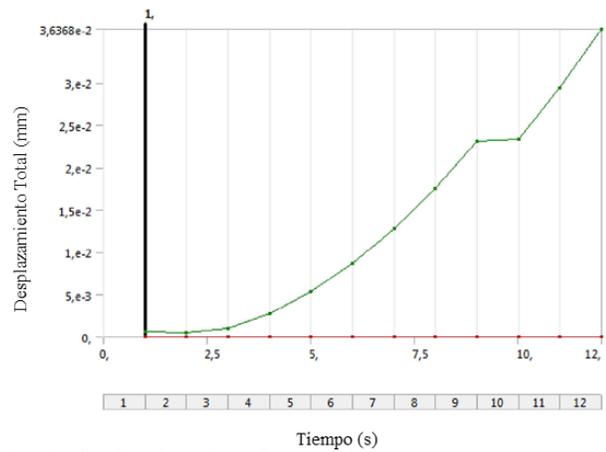


Fig. 25. Gráfica Desplazamiento Total +90°

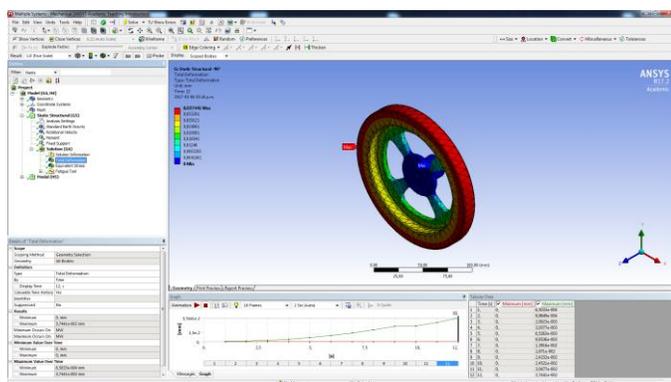


Fig. 26. Desplazamiento Total -90°

**B. Resultado de Análisis de Tensión Equivalente**

De acuerdo a los requerimientos y parámetros definidos anteriormente, en la TABLA X se describe para cada grado de inclinación de la rueda de momento y para cada tiempo/etapa de cálculo, los resultados de análisis de tensión equivalente máximos, los cuales representan los valores más críticos en dicho análisis.

TABLA X  
TENSIÓN EQUIVALENTE MÁXIMA (MPa)

Inclinación /Tiempo (s)	0°	+45°	-45°	+54.7°	-54.7°	+90°	-90°
1	0.10 298	0.22 946	0.23 238	0.2423 1	0.239 52	0.27 233	0.26 039
2	0.37 052	0.38 205	0.47 704	0.4091 8	0.499 77	0.44 710	0.49 492
3	1.21 260	1.04 940	1.29 590	1.0171 0	1.340 90	1.00 810	1.31 300
4	2.61 700	2.42 190	2.67 080	2.4546 0	2.747 90	2.38 990	2.68 530
5	4.58 280	4.38 670	4.66 080	4.5378 0	4.718 30	4.35 910	4.63 890
6	7.10 980	6.97 150	7.24 570	7.2160 0	7.251 50	6.89 070	7.16 610
7	10.1 9700	10.1 3000	10.4 0400	10.488 00	10.34 700	9.98 420	10.2 5400
8	13.8 4500	13.8 6000	14.1 3500	14.354 00	14.00 300	13.6 3900	13.9 0200
9	18.0 5200	18.1 6200	18.4 3700	18.812 00	18.22 000	17.8 5500	18.1 0900
10	18.2 7600	18.3 9100	18.6 6600	19.050 00	18.44 500	18.0 7900	18.3 3300
11	22.8 1800	23.0 3500	23.3 1100	23.862 00	22.99 700	22.6 3000	22.8 7500
12	28.1 4100	28.4 7800	28.7 5400	29.502 00	28.33 300	27.9 6500	28.1 9900

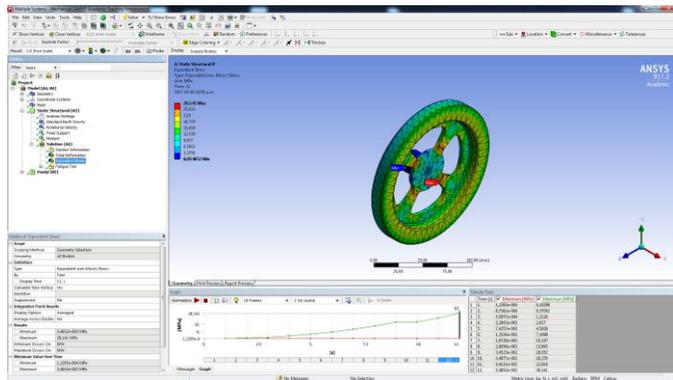


Fig. 28. Tensión Equivalente 0°

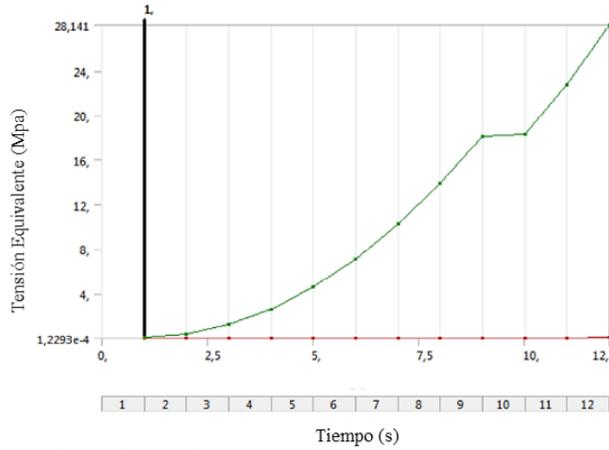


Fig. 29. Gráfica Tensión Equivalente 0°

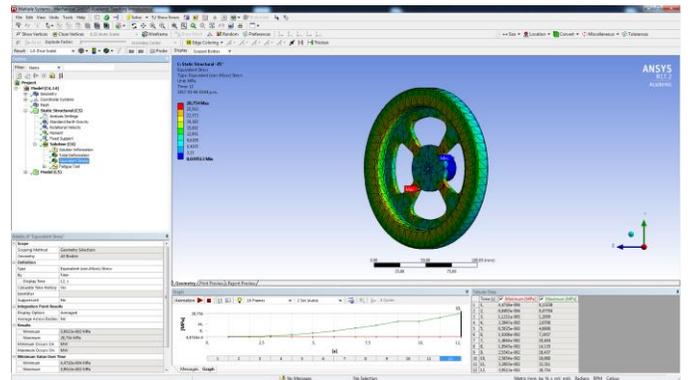


Fig. 32. Tensión Equivalente -45°

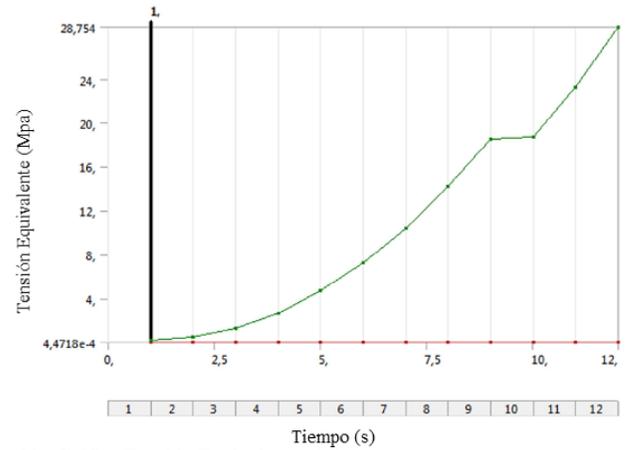


Fig. 33. Gráfica Tensión Equivalente -45°

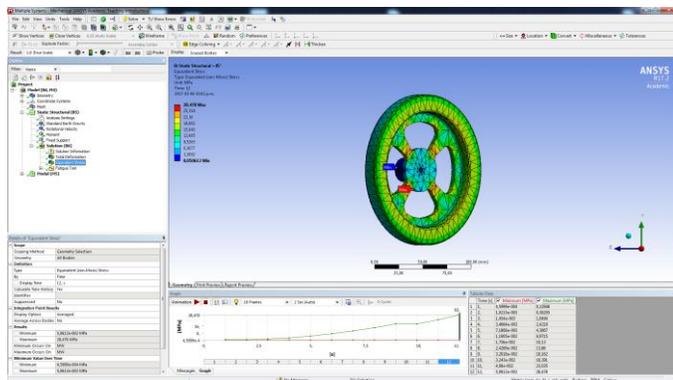


Fig. 30. Tensión Equivalente +45°

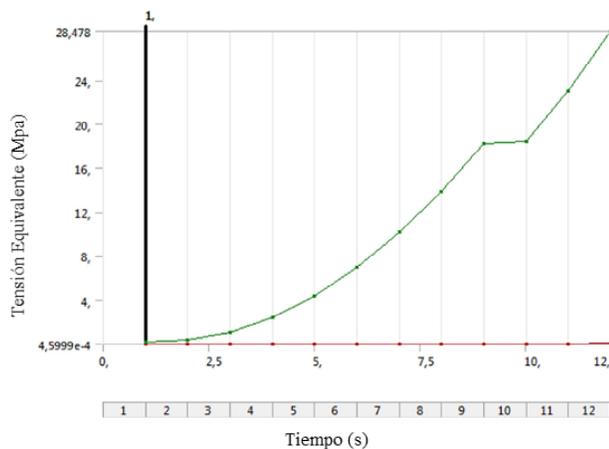


Fig. 31. Gráfica Tensión Equivalente +45°

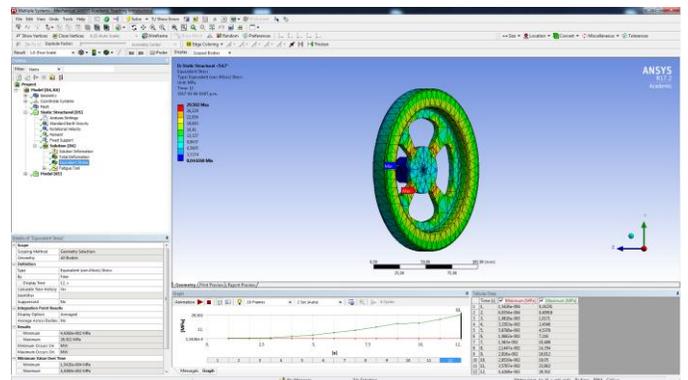


Fig. 34. Tensión Equivalente +54.7°

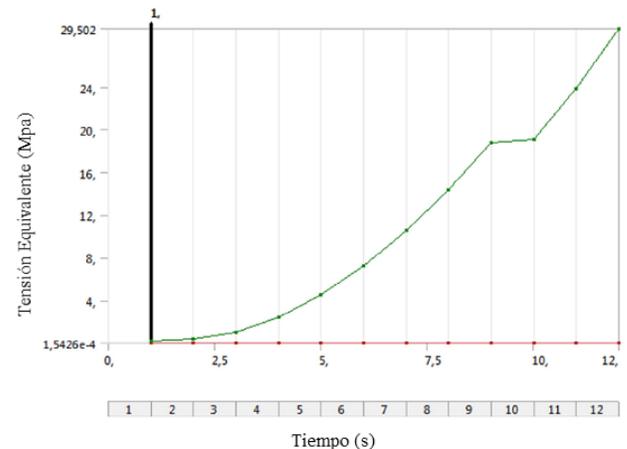


Fig. 35. Gráfica Tensión Equivalente +54.7°

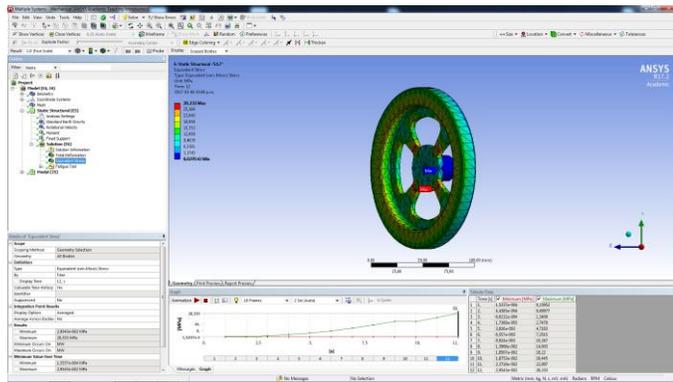


Fig. 36. Tensión Equivalente -54.7°

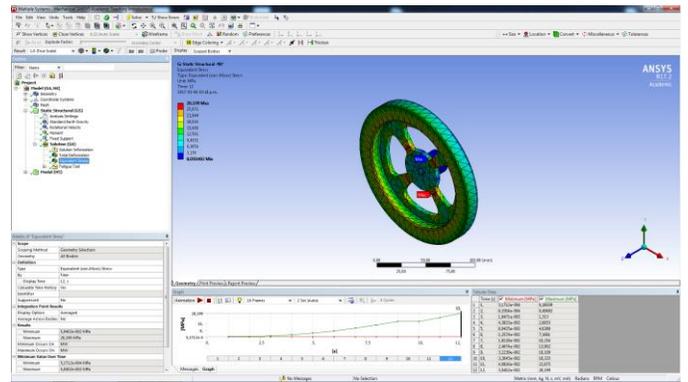


Fig. 40. Tensión Equivalente -90°

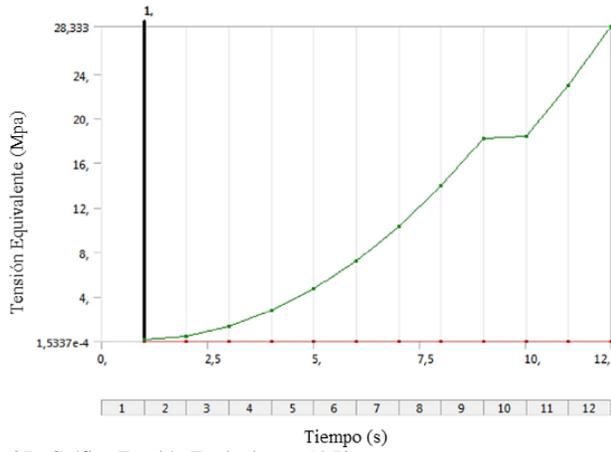


Fig. 37. Gráfica Tensión Equivalente -54.7°

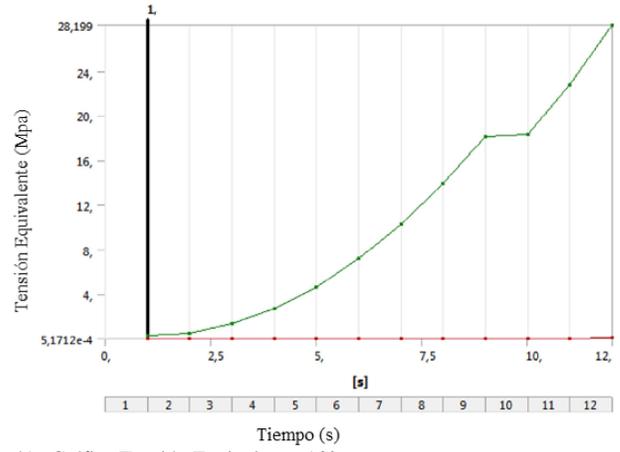


Fig. 41. Gráfica Tensión Equivalente -90°

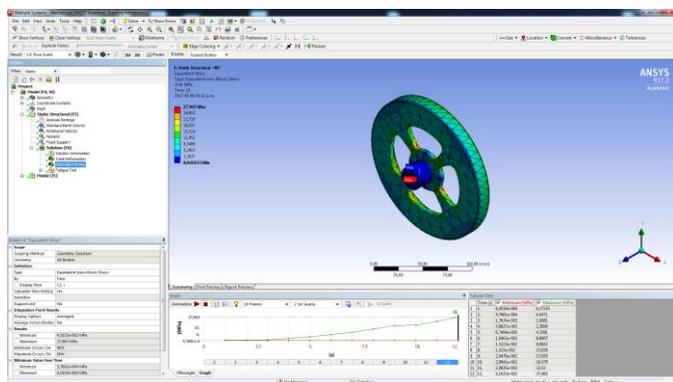


Fig. 38. Tensión Equivalente +90°

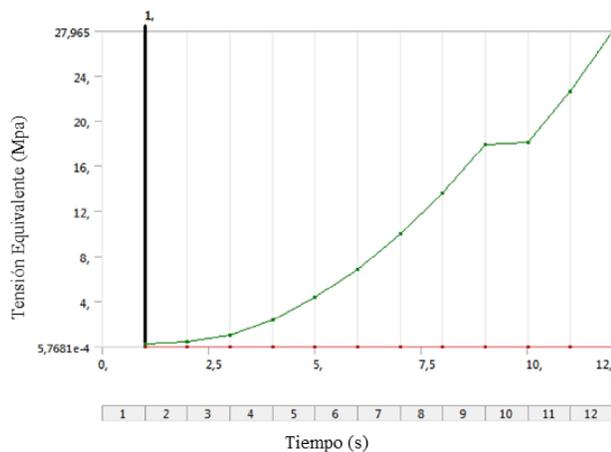


Fig. 39. Gráfica Tensión Equivalente +90°

C. Resultado de Análisis de Fatiga

De acuerdo a los requerimientos y parámetros definidos anteriormente, en la TABLA XI se describe para cada grado de inclinación de la rueda de momento, los resultados de análisis de fatiga, describiendo valores de vida y factor de seguridad.

TABLA XI  
FATIGA (VIDA Y FACTOR DE SEGURIDAD)

Inclinación	0°	+45°	-45°	+54.7°	-54.7°	+90°	-90°
Vida (Ciclos)	1.0 E+08	1.0E+08	1.0 E+08	1.0E+08	1.0E+08	1.0E+08	1.0 E+08
Factor de Seguridad (S.F)	2.9402	2.9054	2.8775	2.8045	2.9203	2.9587	2.9342

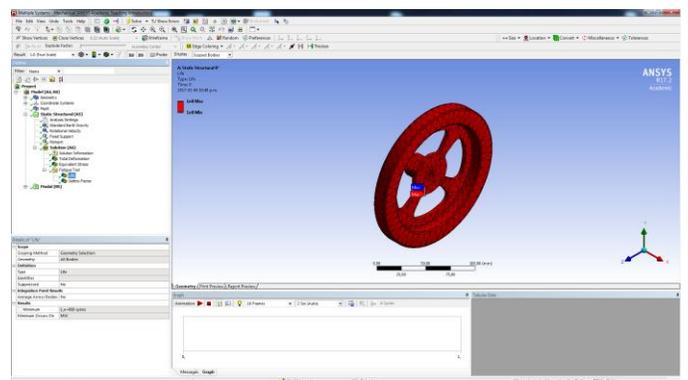


Fig. 42. Ciclos de Vida 0° +45° -45° +54.7° -54.7° 90° -90°

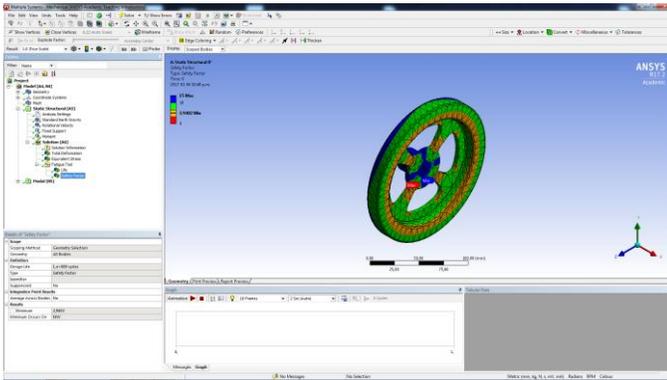


Fig. 43. Factor de Seguridad 0°

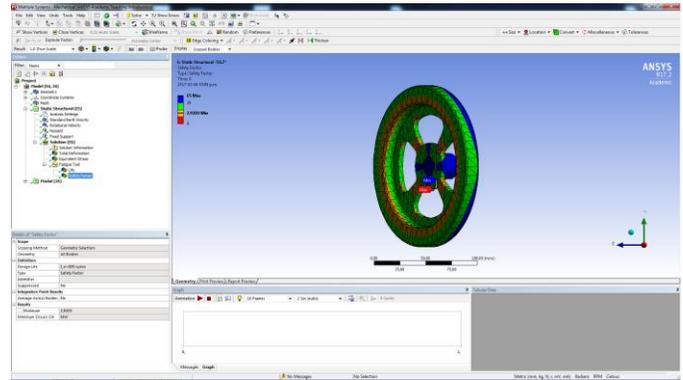


Fig. 47. Factor de Seguridad -54.7°

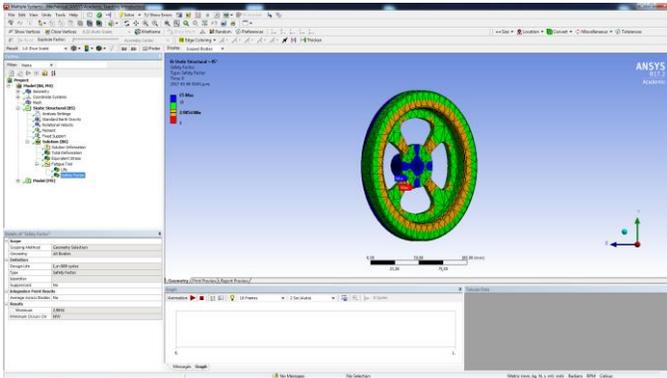


Fig. 44. Factor de Seguridad +45°

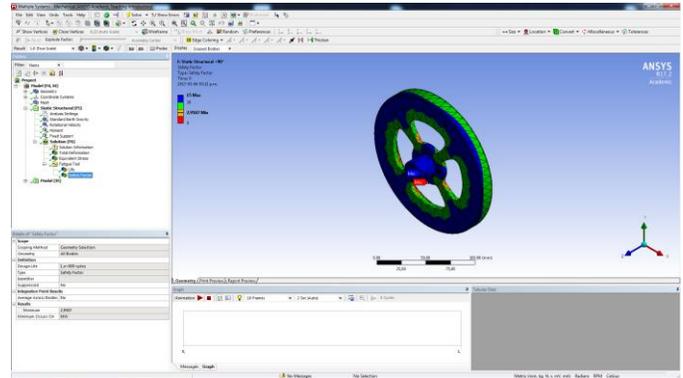


Fig. 48. Factor de Seguridad +90°

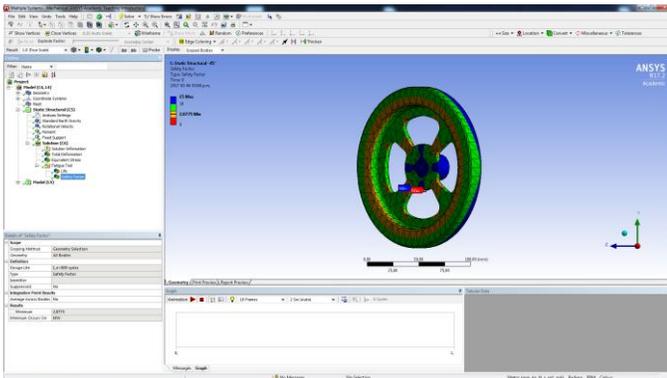


Fig. 45. Factor de Seguridad -45°

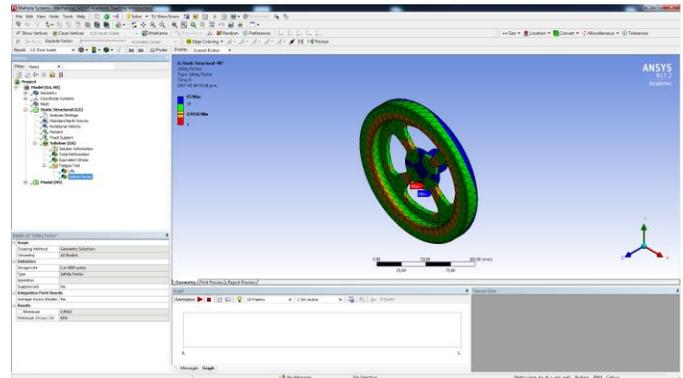


Fig. 49. Factor de Seguridad -90°

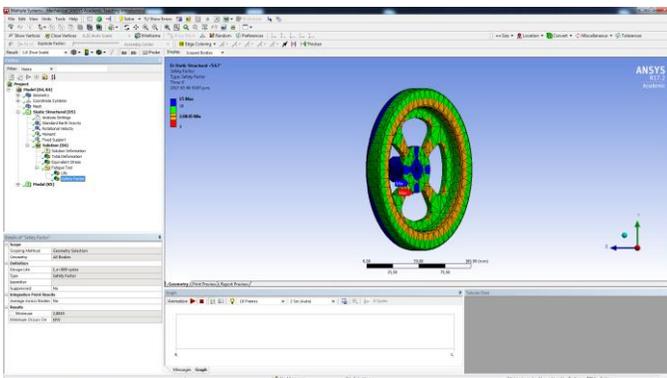


Fig. 46. Factor de Seguridad +54.7°

*D. Resultado de Análisis Modal*

El análisis modal de la rueda de momento se desempeña para verificar los requerimientos de frecuencia de las mismas. Este análisis es desarrollado en diez modos de frecuencia. De acuerdo a los requerimientos y parámetros definidos anteriormente, en la TABLA XII se describe para cada grado de inclinación y para cada modo de frecuencia, los resultados de análisis modal.

TABLA XII  
FRECUENCIAS (HZ)

Inclinación/ N° Modo	0°	+45°	-45°	+54.7°	-54.7°	+90°	-90°
1	392. 53	391. 31	391.1 9	391.78	391.9 4	391. 96	391. 74
2	392. 98	391. 90	392.3 4	392.13	392.4 5	392. 28	392. 17
3	611. 44	606. 00	609.8 1	608.40	608.0 2	606. 57	609. 41

Inclinación/ Nº Modo	0°	+45°	-45°	+54.7°	-54.7°	+90°	-90°
4	647. 87	644. 75	645.3 5	645.84	646.2 1	646. 11	646. 04
5	1987. .80	1987. .80	1987. 90	1988.1 0	1988. 10	1988. .10	198 7.90
6	1993. .10	1992. .70	1992. 90	1992.9 0	1993. 00	1993. .10	199 2.80
7	3196. .90	3193. .90	3195. 90	3196.4 0	3196. 20	3195. .50	319 5.30
8	3198. .90	3195. .10	3197. 10	3197.5 0	3196. 70	3196. .10	319 7.10
9	4706. .70	4704. .30	4705. 10	4704.4 0	4705. 20	4704. .30	470 4.60
10	5345. .20	5345. .00	5345. 20	5345.4 0	5344. 90	5345. .40	534 5.00

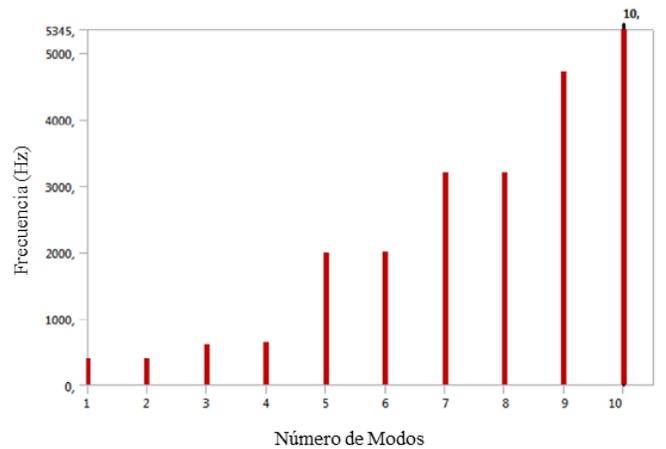


Fig. 53. Gráfica Frecuencia +45°

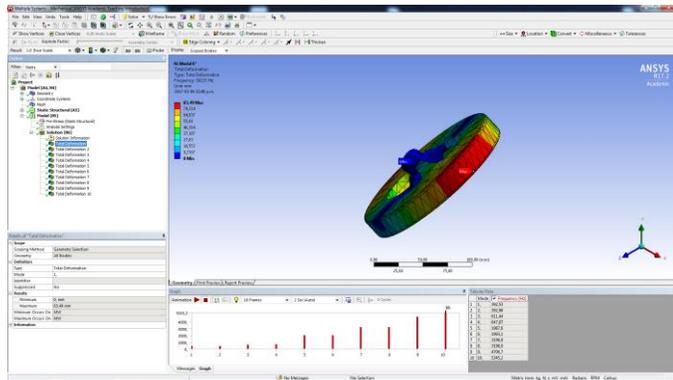


Fig. 50. Frecuencia 0°

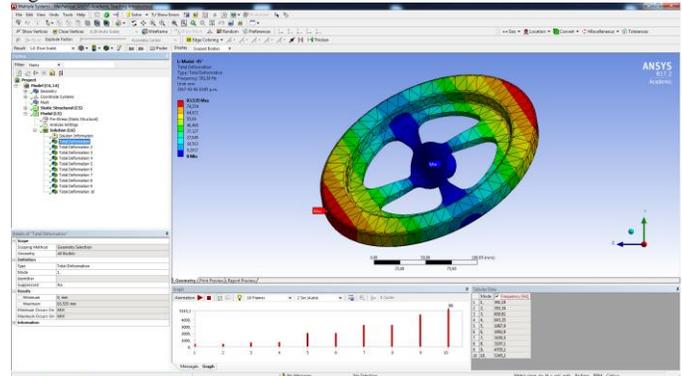


Fig. 54. Frecuencia -45°

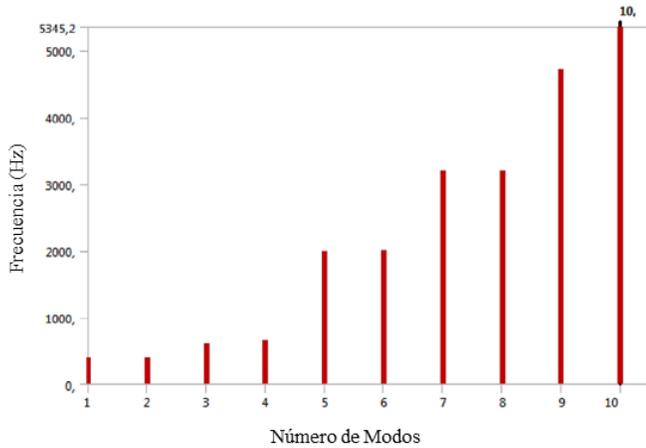


Fig. 51. Gráfica Frecuencia 0°

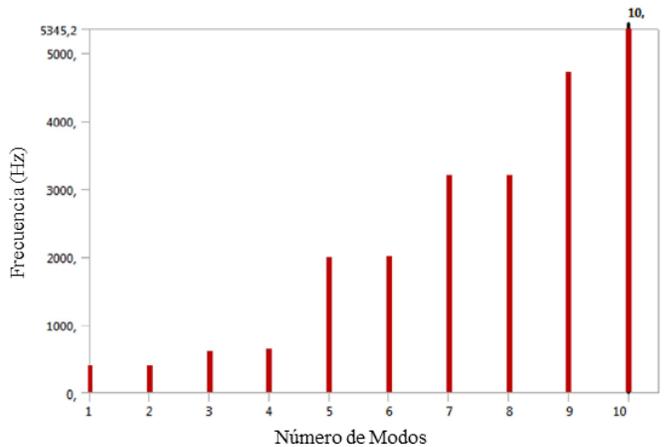


Fig. 55. Gráfica Frecuencia -45°

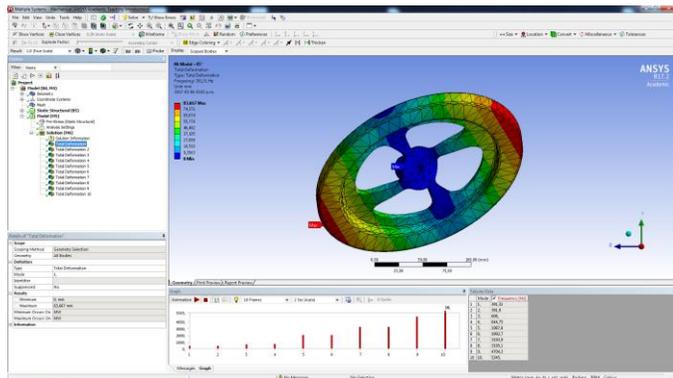


Fig. 52. Frecuencia +45°

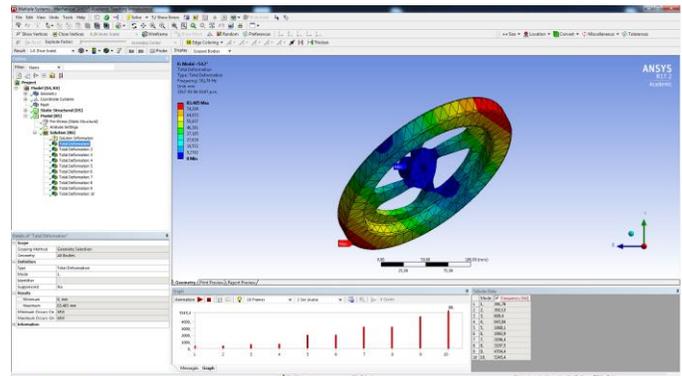


Fig. 56. Frecuencia +54.7°

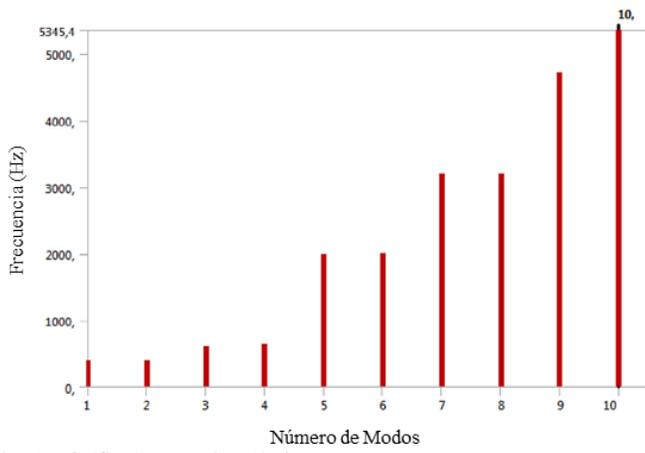


Fig. 57. Gráfica Frecuencia +54.7°

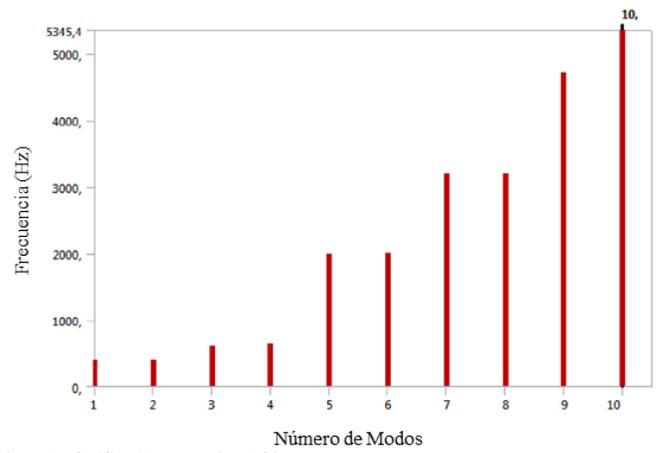


Fig. 61. Gráfica Frecuencia +90°

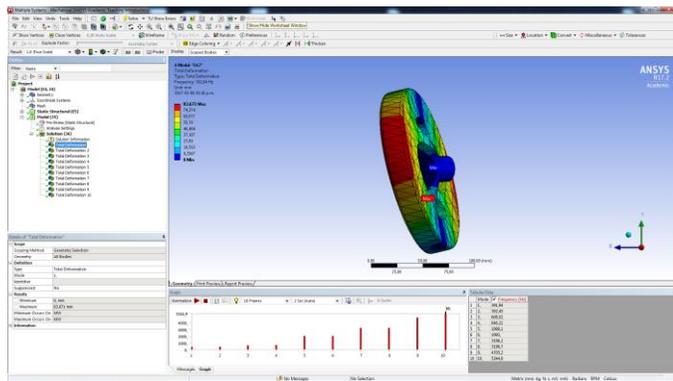


Fig. 58. Frecuencia -54.7°

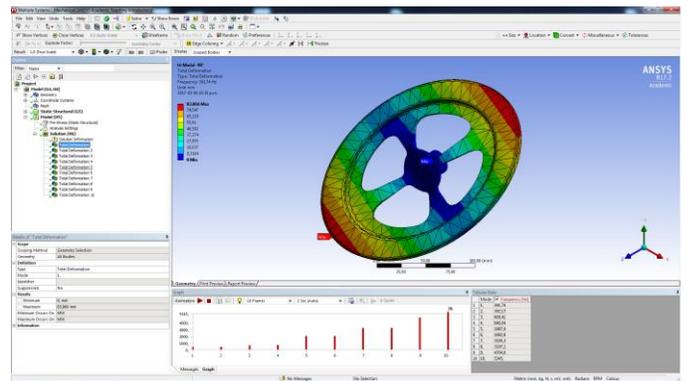


Fig. 62. Frecuencia -90°

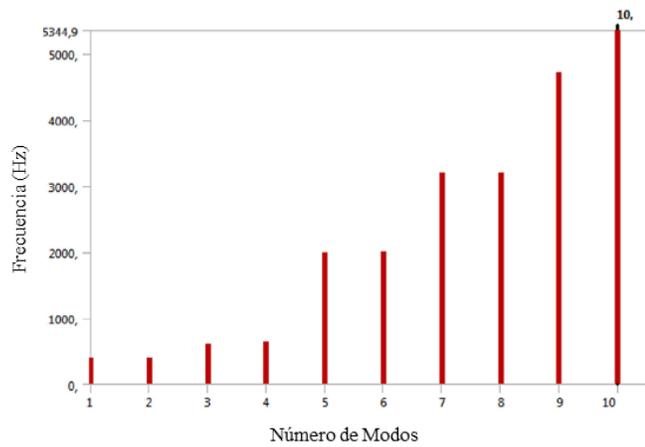


Fig. 59. Gráfica Frecuencia -54.7°

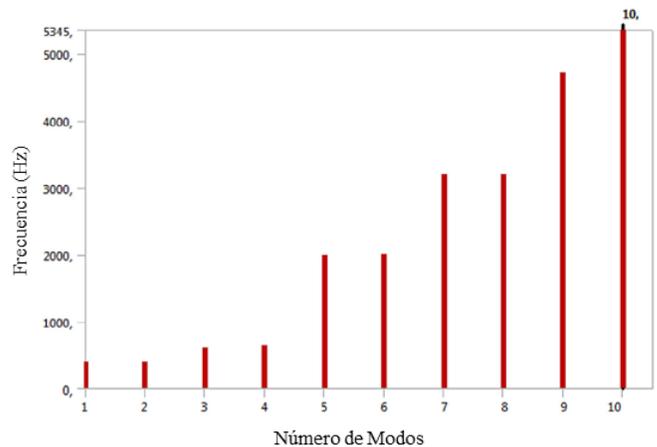


Fig. 63. Gráfica Frecuencia -90°

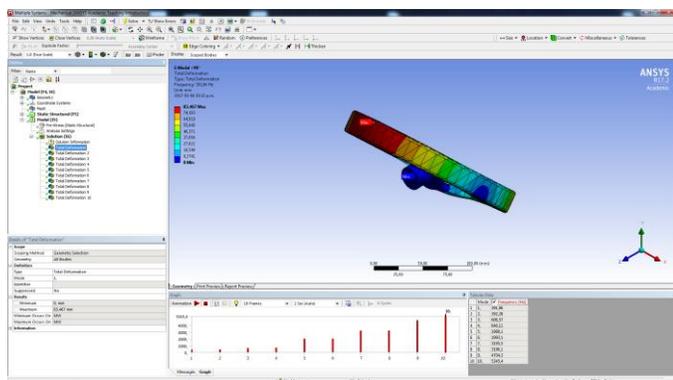


Fig. 60. Frecuencia +90°

### VIII. CONCLUSIÓN

Los requerimientos técnicos de diseño y los resultados de análisis del dispositivo de intercambio de momento se describen en la TABLA XIII, mostrada a continuación.

TABLA XIII  
REQUERIMIENTOS TÉCNICOS VS. RESULTADOS DEL ANÁLISIS

Descripción	Requerimiento	Resultado	Observación
Masa de Rueda de Momento (kg)	$\leq 0.5$ Kg.	0.45278 Satisfactorio	Estimado
Factor de Seguridad (S.F)	$\geq 1.5$	2.8045 Satisfactorio	Estimado
Momento de Inercia X ( $kg.m^2$ )	$> 2.0 \times 10^{-3}$	$1.8 \times 10^{-3}$ No Satisfactorio	Estimado

Debido a que el momento de inercia requerido no fue satisfactorio al obtener los resultados, la velocidad angular nominal de 2000 RPM debe ser regulada de acuerdo a los resultados obtenidos.

De acuerdo a los resultados de análisis de desplazamiento total máximos descritos en la TABLA IX, se observa que el mayor desplazamiento tiene un valor de  $3.7441E-02$  mm, el cual corresponde a la rueda de momento con inclinación de  $-90^\circ$  en el tiempo/etapa de cálculo N° 12. Dicho valor no es representativo para desplazamientos importantes debido a que su resultado es muy cercano a cero (0).

La TABLA X muestra los resultados de las tensiones equivalentes máximas, se observa que la mayor tensión tiene un valor de 29.50200 MPa, el cual corresponde a la rueda de momento con inclinación de  $+54.7^\circ$  en el tiempo/etapa de cálculo N° 12. Dicho valor no es representativo para tensiones importantes, debido a que el módulo de elasticidad del material empleado (Al 6061 T6) es igual a 68899 MPa (TABLA III), dado estos valores, se concluye que el dispositivo puede resistir las cargas y/o condiciones en las que está sometido debido al uso del material descrito.

La TABLA XI describe el factor de seguridad para la rueda de momento en cada grado de inclinación. De acuerdo al requerimiento de factor de seguridad requerido, el cual debe ser igual a 1.5, los resultados descritos en esta tabla, indican que el valor más crítico o bajo es de 2.8045, el cual corresponde a la rueda de momento con inclinación de  $+54.7^\circ$ , esto indica que se cuenta con un factor de seguridad mayor al requerido evitando riesgos importantes.

## REFERENCES

- [1] E. Pérez and E. Hernández, "Diseño de dispositivo de intercambio de momento," Puerto Cabello, 2014.
- [2] "RE 30 Æ30 mm, Graphite Brushes, 60 Watt - Treffer," Mayo 2008. [Online]. Available: <http://www.treffer.com.br/produtos/maxon/motores/pdf/81.pdf>.
- [3] "Encoder HEDS 5540, 500 Counts per turn, 3 Channels - Research," Mayo 2010. [Online]. Available: [http://research.vuse.vanderbilt.edu/MEDLab/haptic\\_paddle\\_files/EncoderSpec2011.pdf](http://research.vuse.vanderbilt.edu/MEDLab/haptic_paddle_files/EncoderSpec2011.pdf).
- [4] E. Pérez and K. Mieres, "Diseño y fabricación de elementos estructurales de un sistema de intercambio de momento," Puerto Cabello, 2017.
- [5] X. Carrazco and F. Guillen, "Desarrollo de una plataforma de pruebas de AOCS&UPS," Puerto Cabello, 2016.



**Karla D. Mieres H.** Nació en Puerto Cabello, Edo. Carabobo, Venezuela, el 03 de febrero de 1988. Sus seis años de educación primaria los cursó en la U. E. Vista Mar, seguidamente, tres años de secundaria en el Liceo Fray Miguel y sus últimos dos años de ciclo diversificado en el Liceo Nacional Miguel Peña, culminando así sus estudios de educación básica en el año 2004. En el año 2005, inicia sus estudios de pregrado en la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada (U.N.E.F.A) de esta misma ciudad, obteniendo el título

de Ingeniero Mecánico en diciembre de 2011.

Ella actualmente ejecuta el cargo de Ingeniero de Diseño en la Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales (ABAE) – Centro de Investigación Desarrollo Espacial (CIDE), desde agosto 2014.