

## GUIA DE OBSERVACIÓN PARA EXPOSICIÓN INDIVIDUAL Y/O POR EQUIPO

DOCENTE: <b>Joel Francisco Pava Chipol</b>	ASIGNATURA: <b>Formulacion y Evaluacion de Proyectos</b>			
<b>DATOS GENERALES DEL PROCESO DE EVALUACIÓN</b>				
PERIODO: <b>Agosto - Diciembre 2025</b>	UNIDAD:			
TEMA:	FECHA DE PRESENTACIÓN:			
<b>INSTRUCCIÓN</b>				
Revisar los documentos o actividades que se solicitan y marque en los apartados "SI" cuando la evidencia a evaluar se cumple; en caso contrario marque "NO". En la columna "OBSERVACIONES" ocúpela cuando tenga que hacer comentarios referentes a lo observado.				
VALOR DEL REACTIVO	CARACTERÍSTICA A CUMPLIR (REACTIVO)	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SI	NO	
10%	<b>Puntualidad:</b> para iniciar y concluir la exposición.			
10%	<b>Esquema de diapositiva.</b> Colores y tamaño de letra apropiada. Sin saturar las diapositivas de texto.  <b>Portada:</b> Nombre de la escuela (logotipo), Carrera, Asignatura, Profesor, Alumnos, Matricula, Grupo, Lugar y fecha de entrega.			
5%	<b>Ortografía:</b> (cero errores ortográficos).			
10%	<b>Exposición.</b> a. Utiliza las diapositivas como apoyo, no lectura total			
20%	b. Desarrollo del tema fundamentado y con una secuencia estructurada.			
10%	c. Organización de los integrantes del equipo.			
5%	d. Expresión no verbal (gestos, miradas y lenguaje corporal).			
30%	<b>Preparación de la exposición.</b> Dominio del tema. Habla con seguridad.			
100%	<b>CALIFICACIÓN</b>			
<b>INTEGRANTES</b>		<b>EQUIPO:</b> _____		

**LISTA DE COTEJO DE INVESTIGACION DOCUMENTAL**

DOCENTE: <b>Joel Francisco Pava Chipol</b>	ASIGNATURA: Formulacion y Evaluacion de Proyectos			
PERIODO: Agosto - Diciembre 2025	<b>UNIDAD:</b>			
<b>DATOS GENERALES DEL PROCESO DE EVALUACIÓN</b>				
<b>NOMBRE DEL ALUMNO O NUMERO DEL EQUIPO:</b>				
<b>TEMA:</b>	<b>FECHA DE ENTREGA:</b>			
INSTRUCCIONES				
<p>Revisar las actividades que se solicitan y marque en los apartados "SI" cuando la evidencia se cumple; en caso contrario marque "NO". En la columna "OBSERVACIONES" indicaciones que puedan ayudar al alumno a saber cuáles son las condiciones no cumplidas, si fuese necesario.</p>				
<b>VALOR DEL REACTIVO</b>	<b>CARACTERÍSTICA A CUMPLIR (REACTIVO)</b>	<b>CUMPLE</b>		<b>OBSERVACIONES</b>
		<b>SI</b>	<b>NO</b>	
10%	<b>Presentación</b> El trabajo cumple con los requisitos de: <ul style="list-style-type: none"> <li>a. Buena presentación</li> <li>b. Mismo formato (letra arial 14 para títulos con negritas y contenido arial 12, texto justificado)</li> <li>c. Limpieza y orden</li> <li>d. Ortografía (El documento es redactado de forma correcta sin faltas de ortografía)</li> </ul>			
30%	<b>Ideas relevantes:</b> Presenta el contenido más relevante del tema abordado, se centra en la idea principal y compara información de referencias formales de mínimo tres autores.			
10%	<b>Imágenes y gráficos de apoyo:</b> Presenta imágenes, fotografías, tablas, gráficos de apoyo o fórmulas que respalden la información presentada.			
30%	<b>Coherencia y cohesión:</b> Maneja el lenguaje técnico apropiado y presenta en todo el documento coherencia y secuencia entre párrafo.			
10%	<b>Referencias bibliográficas:</b> De fuentes formales y citadas al final del documento de forma correcta.			
10%	<b>Responsabilidad:</b> Entregó el resumen en la fecha y hora señalada.			
100%	<b>CALIFICACIÓN</b>			

# EXÁMENES



AUTOR:

JUAN ANTONIO TEOBA ROSALES

YAHVE ALEJANDRO CHIPOL XOLO

SANDRA CRUZ GARCIA

INSTITUTO TECNOLOGICO SUPERIOR DE SAN ANDRES TUXTLA

MATERIA: FORMULACION Y EVALUACION DE PROYECTOS

**SIMULACIÓN DEL MECANISMO DE BLOQUEO EN LOS  
TENDONES DE LAS EXTREMIDADES POSTERIORES DE LOS  
MURCIÉLAGOS DEL GÉNERO PTEROPUS, APLICANDO  
SOLIDWORKS**

CARRERA: ING. ELECTROMECÁNICA

ESCUELA: ITSSAT

PROFESORA: BLANCA NICANDRIA RIOS ATAXCA

FECHA: 10/12/2025

GRUPO: 602-B

TURNO: VESPERTINO



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE  
SAN ANDRÉS TUXTLA

## Contenido

RESUMEN .....	3
ANTECEDENTES:.....	4
JUSTIFICACIÓN .....	6
OBJETIVO GENERAL.....	7
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
ALCANCES.....	8
DELIMITACIONES .....	8
MATERIALES Y MÉTODOS.....	9
PRODUCTO COMPROMETIDO .....	12
Conclusión .....	17
Bibliografía.....	18

## RESUMEN

La biomecánica es una disciplina que estudia el comportamiento mecánico de los organismos vivos, enfocándose en cómo generan, controlan y resisten fuerzas durante el movimiento. En particular, el estudio biomecánico de los murciélagos ha captado interés debido a su capacidad de adherirse a superficies verticales gracias a adaptaciones en sus extremidades y garras. Esta habilidad ha inspirado desarrollos tecnológicos en áreas como la robótica, la biomimética y el diseño de prótesis.

Diversos estudios han explorado aspectos del vuelo y agarre de los murciélagos. E. Hueso et al. (2005) analizaron la dinámica del vuelo a través de visualizaciones de vórtices de aire. Posteriormente, A. J. Bergou et al. (2015) realizaron un modelo 3D del movimiento articular mediante rastreo cinemático. En 2016, Y. Liu et al. diseñaron un robot volador inspirado en murciélagos, capaz de adherirse a superficies, con aplicaciones en seguridad e industria.

El foco principal de este trabajo es el mecanismo de bloqueo de los tendones en las extremidades inferiores de los murciélagos, que les permite colgarse sin esfuerzo muscular. Este fenómeno, resultado de adaptaciones fisiológicas, ofrece modelos eficientes para el diseño de mecanismos de agarre pasivo. En robótica y biomimética, este mecanismo puede ser clave para desarrollar sistemas energéticamente eficientes que imiten la sujeción natural de los murciélagos.

Se busca diseñar un mecanismo simulado que reproduzca este comportamiento, comprendiendo primero la fisiología del sistema, su eficiencia energética y modelándolo mediante software especializado. Se estudian además propiedades mecánicas como elasticidad, rigidez, plasticidad y flexibilidad, esenciales para replicar el comportamiento biológico. También se analiza el mecanismo de trinquete, que comparte principios similares de bloqueo unidireccional, siendo relevante para aplicaciones en sistemas mecánicos inspirados en la naturaleza.

## **ANTECEDENTES:**

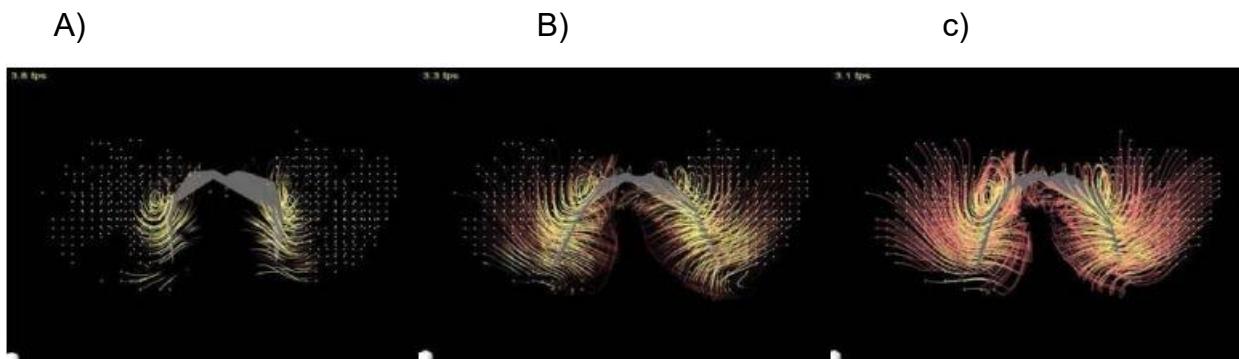
La biomecánica es una disciplina científica que estudia el comportamiento mecánico de los organismos vivos, con el objetivo de comprender cómo se generan, controlan y resisten las fuerzas en los cuerpos biológicos durante sus movimientos y actividades. A través de la biomecánica, se pueden analizar y modelar las interacciones entre los músculos, huesos, tendones y otros componentes del sistema musculoesquelético, proporcionando información valiosa para diversas áreas como la medicina, la rehabilitación, el diseño de prótesis, el deporte y la robótica.

Dentro de los muchos temas de estudio de la biomecánica, uno de los que ha captado gran atención es el comportamiento de las especies de murciélagos, particularmente aquellas que tienen la capacidad única de adherirse a superficies verticales de diferentes texturas. Esta habilidad, que les permite descansar en lugares inaccesibles para otros animales, se debe a su adaptado sistema de agarre, el cual aprovecha la estructura especializada de sus extremidades y garras.

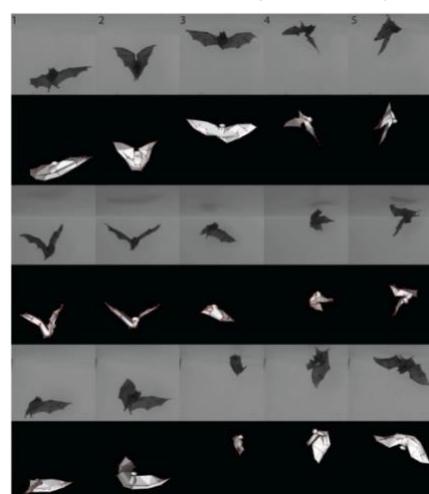
El análisis biomecánico de estas adaptaciones ofrece claves para el desarrollo de nuevas tecnologías, como materiales adhesivos o dispositivos de sujeción que imiten la eficiencia de los murciélagos en su interacción con el entorno vertical.

Este enfoque no solo aporta al conocimiento fundamental sobre la biología de los murciélagos, sino que también tiene un impacto en el desarrollo de aplicaciones prácticas en diversas áreas de la ciencia y la ingeniería.

En el trabajo de E. Hueso et al. [1] finalizado en el 2005 los biólogos realizan la comprensión de la mecánica del vuelo del murciélagos al visualizar los vórtices del flujo del aire que son generados a partir de un modelo en movimiento, como se muestra en la ilustración #1. Este estudio fue realizado en el 2004 y finalizó en el 2005.



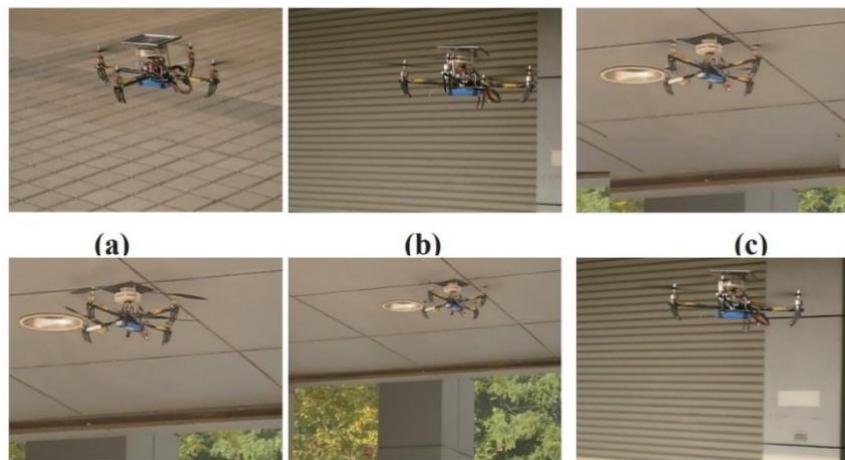
*Ilustración 1* Las líneas de corriente se ven definidas en regiones de bajo  $\lambda_2$ . (a), (b), (c) muestran variaciones del mapeo de transparencia a  $\lambda_2$ .



*Ilustración 2* Seguimiento en el mundo real de murciélagos que realizan rotaciones aéreas complejas analizado utilizando el modelo de murciélago articulado de 52 grados de libertad

(2015) En el trabajo de A. J. Bergou et. al. [2] se realiza la visualización y el análisis del movimiento de las articulaciones del murciélagos por medio de un modelo 3D que fue construido a través de un rastreo cinemático de un conjunto disperso de puntos a partir de un video utilizando un filtrado de Kalman, como se muestra en la ilustración # 2 donde se estima la postura del murciélagos con respecto al tiempo.

(2016) En el trabajo de Y. Liu et. al. [3] se presenta un robot volador tipo murciélagos que tiene la capacidad de adherirse a las superficies como paredes y techos. En el artículo se puede encontrar el desarrollo del diseño del mecanismo de adhesión, de vuelo, la integración y el control. Este robot cuenta con las características de que es



*Ilustración 3 conjunto de fotos que muestran el robot volando y adhiriéndose a la superficie del techo*

liviano y de bajo consumo de energía donde sus aplicaciones principales son para el sector industrial y la seguridad pública.

En este caso se estudiará el mecanismo de bloqueo de los tendones en las extremidades inferiores de los murciélagos. Este tema fue estudiado en detalle debido a su relevancia para entender cómo estos animales logran descansar suspendidos sin esfuerzo muscular, una característica que es crítica para su vida nocturna. Este fenómeno involucra una serie de adaptaciones en los tendones y las articulaciones de las extremidades posteriores.

## JUSTIFICACIÓN

Aplicaciones biomiméticas y tecnológicas:

El estudio de este mecanismo de bloqueo es descubrir una gran relevancia tecnológica, especialmente en el campo de la biomimética, que busca imitar los principios y estrategias de la naturaleza para diseñar tecnologías innovadoras. El mecanismo de bloqueo de los tendones de los murciélagos es un ejemplo claro de

eficiencia y adaptabilidad biológica, lo que ofrece un modelo que podría inspirar el diseño de sistemas de agarre pasivos en robótica, prótesis, y dispositivos de ingeniería

En este caso investigar las aplicaciones de este mecanismo de bloqueo de los tendones de las extremidades inferior de murciélagos en campos como la biomimética, la robótica y la ingeniería de prótesis.

En la biomimética, o la imitación de soluciones biológicas para resolver problemas tecnológicos, puede beneficiarse enormemente de este mecanismo de bloqueo de los tendones. Los murciélagos, al usar tendones elásticos para colgarse sin un esfuerzo muscular continuo, ofrecen un modelo eficaz para el diseño de sistemas de sujeción o mecanismos de agarre que necesitan ser eficientes, ligeros y funcionales.

En el campo de la robótica, los robots que imitan la biología (biomiméticos) están siendo desarrollados para tareas complejas como la manipulación de objetos, el rescate o la exploración. El mecanismo de bloqueo de los tendones de los murciélagos podría ser útil para diseñar brazos robóticos o manipuladores más eficientes, capaces de sostener objetos sin consumir mucha energía. (Jiawei Meng, 2020)

## **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un mecanismo simulado que reproduzca el comportamiento de las extremidades posteriores del murciélagos

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Comprender la fisiología detallada del mecanismo de bloqueo de los tendones en las extremidades inferiores de los murciélagos.
2. Establecer la relación entre el mecanismo y la eficiencia energética del sistema aplicado.
3. Estudio biomecánico en las extremidades posteriores de los murciélagos

4. Modelar el mecanismo de bloqueo de los tendones en las extremidades inferiores de los murciélagos empleando software para sistemas mecánicos.

## ALCANCES

### 1. Diseño biomecánico simulado:

Se desarrollará un modelo simulado del mecanismo de bloqueo de los tendones en las extremidades inferiores de los murciélagos, utilizando software especializado en modelado mecánico. Este modelo buscará replicar fielmente el comportamiento fisiológico del sistema de sujeción pasiva de los murciélagos.

### 2. Aplicaciones tecnológicas:

Se explorarán posibles aplicaciones del mecanismo simulado en áreas como la robótica biomimética, el diseño de prótesis y dispositivos de agarre pasivo, enfatizando la eficiencia energética y funcionalidad del sistema.

### 3. Análisis biomecánico:

Se realizará un estudio de las propiedades mecánicas relevantes (elasticidad, rigidez, plasticidad y flexibilidad) involucradas en el comportamiento natural del sistema de sujeción del murciélagos, relacionándolas con materiales técnicos que puedan emular dicho comportamiento.

## DELIMITACIONES

- **Especie animal:**

El estudio se centrará exclusivamente en murciélagos que presentan adaptaciones de sujeción pasiva en superficies verticales, sin abordar otras especies con capacidades similares (como aves o insectos).

- **Fase de simulación:**

El proyecto se limita al diseño y modelado simulado del mecanismo. No se contempla la fabricación de un prototipo físico ni pruebas experimentales con organismos reales o materiales.

- **Aspecto funcional:**

Solo se abordará el mecanismo de bloqueo tendinoso en las extremidades posteriores. No se incluirán estudios del vuelo, ecolocalización, ni otras funciones anatómicas del murciélago.

- **Campos de aplicación:**

Las aplicaciones se plantearán de forma conceptual para robótica, biomimética y prótesis, pero no se profundizará en la implementación comercial, costos, normativas técnicas o validación clínica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Propiedades mecánicas de los materiales

Las propiedades mecánicas de un material son todas aquellas características que permiten diferenciarlo de otros, desde el punto de vista del comportamiento mecánico.

### Elasticidad y plasticidad

La elasticidad es la propiedad de un material de recuperar su forma inicial una vez que deja de aplicarse sobre él una fuerza. La plasticidad es la propiedad opuesta: la deformación plástica se mantiene incluso cuando cesa la fuerza. Las proporciones de la resistencia total soportadas en condiciones de comportamiento elástico y plástico se pueden expresar de la siguiente manera:

$$\text{elasticidad} = \sigma_{ult} - \sigma_y$$

$$\text{plasticidad} = (\sigma_{ult} - \sigma_y)/\sigma_{ult}$$

Un ejemplo de material elástico es el caucho, mientras que un material plástico sería, por ejemplo, la plastilina.

### Rigidez y flexibilidad

La rigidez es la capacidad de un material o estructura para resistir deformaciones cuando se le aplica una fuerza. Se refiere a la pendiente de la curva de carga-desplazamiento (rigidez estructural) o a la curva esfuerzo-deformación (módulo de elasticidad o de Young, que es una propiedad del material). En este contexto, la rigidez se usa para describir tanto la estructura como el material, lo que puede generar confusión. Por eso, se recomienda usar el término flexibilidad para referirse a la característica estructural y el módulo de Young para describir la propiedad del material. La flexibilidad es la propiedad opuesta a la rigidez; un material flexible se deforma más fácilmente que uno rígido. Un material con bajo módulo de Young se deforma mucho con poco esfuerzo, mientras que uno con alto módulo de Young se deforma poco ante grandes esfuerzos. El papel y la tela, por ejemplo, son materiales flexibles. Por el contrario, las cerámicas o el vidrio son materiales rígidos, ya que cuando se doblan, se rompen. (RAMIREZ, 2013) (Gude D, 2013)

### Mecanismo de trinquete

A continuación, se describe el mecanismo de trinquete, que es un sistema mecánico que permite el bloqueo unidireccional de un componente móvil, evitando su movimiento en la dirección no deseada, pero permitiendo el movimiento en la dirección deseada. Este mecanismo se encuentra comúnmente en diversas aplicaciones, como en mecanismos de relojería, frenos, y en animales que requieren un agarre seguro y eficiente, como el caso de los murciélagos. Este mecanismo se emplea para producir un movimiento circular intermitente a partir de un miembro oscilatorio o reciprocante. En la siguiente ilustración se muestra La rueda 4 recibe

movimiento circular intermitente por medio del brazo 2 y el trinquete motriz 3. Un segundo trinquete 5 impide que la rueda 4 gire hacia atrás cuando el brazo 2 gira en el sentido de las manecillas del reloj al prepararse para otra carrera.

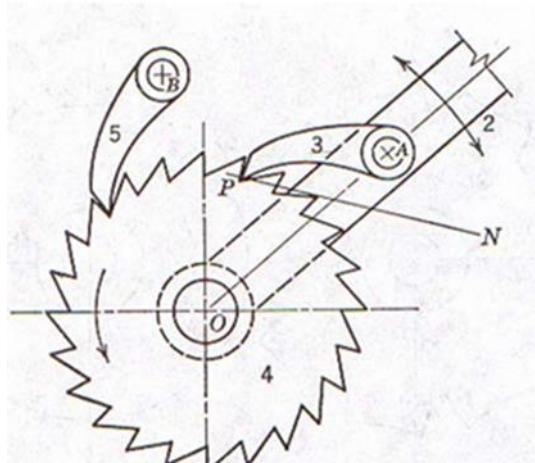


Ilustración 4. Mecanismo de trinquete

La línea de acción PN del risques motriz y del diente debe pasar entre los centros 0 y A, como se muestra, con el propósito de que el trinquete permanezca en contacto con el diente. La línea de acción (que no se muestra) para el trinquete de fijación y el diente debe pasar entre los centros B y R. Este mecanismo tiene muchas aplicaciones, en especial en dispositivos de conteo. (Fundamentos De Maquinas (WMN), 2010)

## PRODUCTO COMPROMETIDO

A continuacion mostraremos los pasos que se ejercieron mediante simulaciones en ANSYS y Solidworks:

Imagen 1

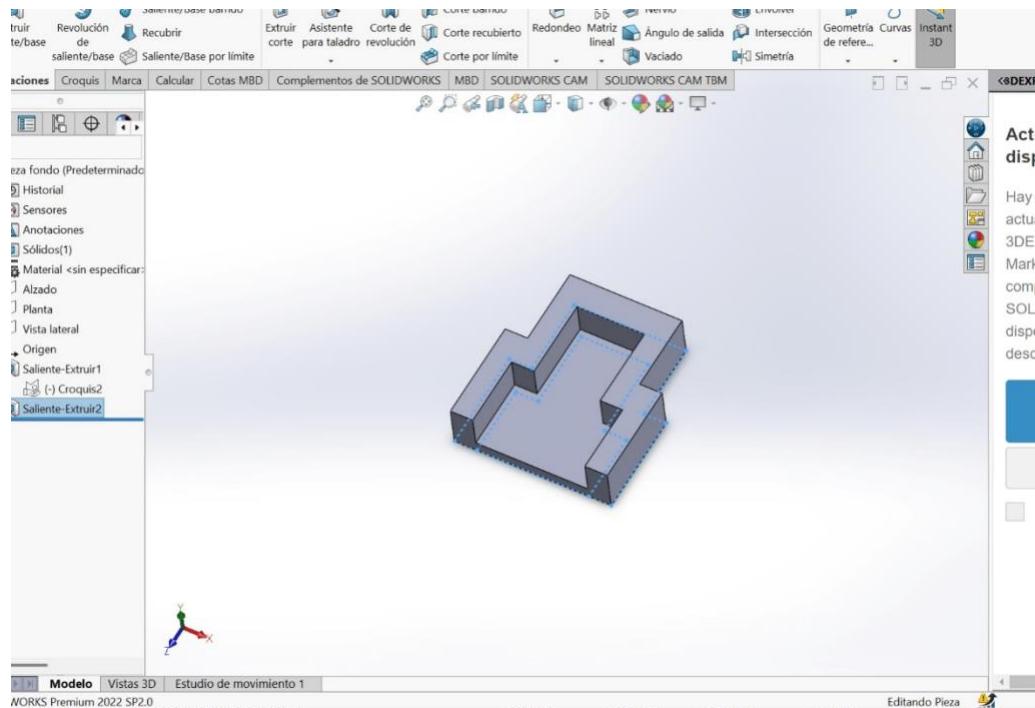


Imagen 2

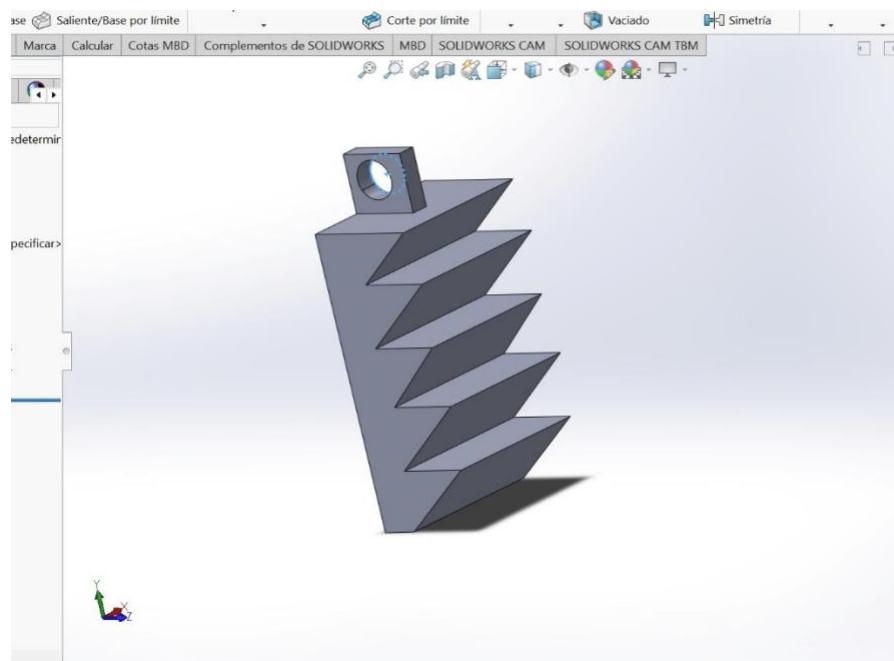


Imagen 3

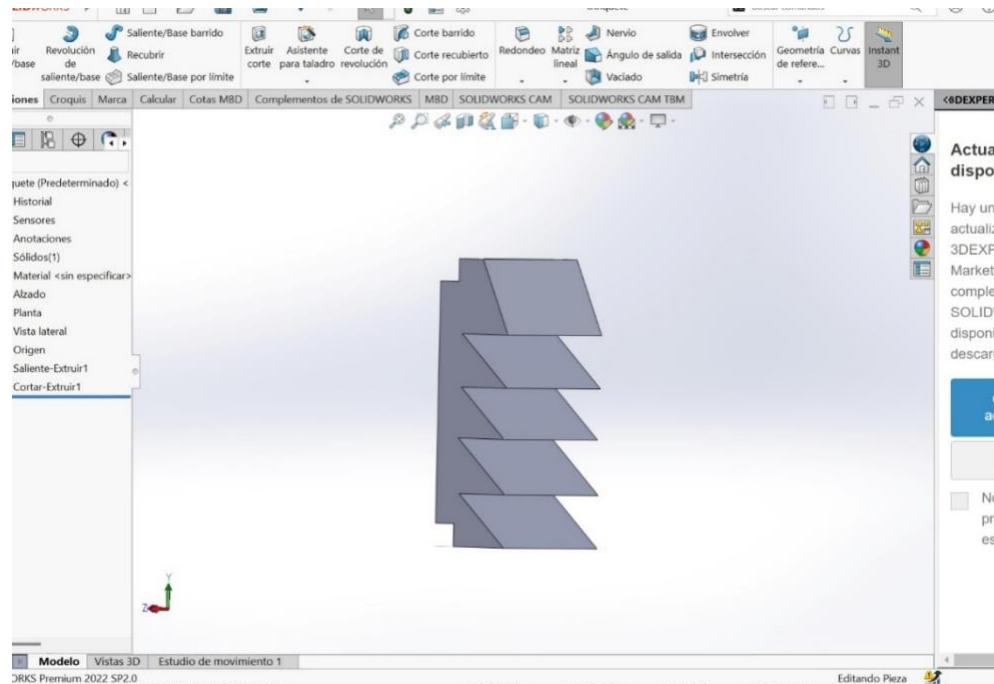


Imagen 4

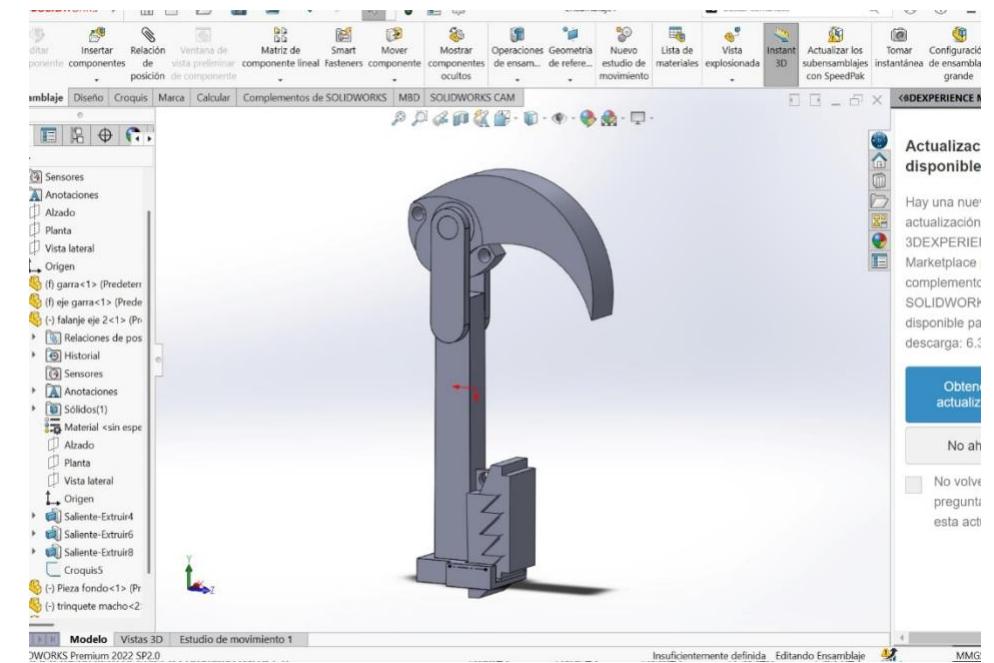


Imagen 5

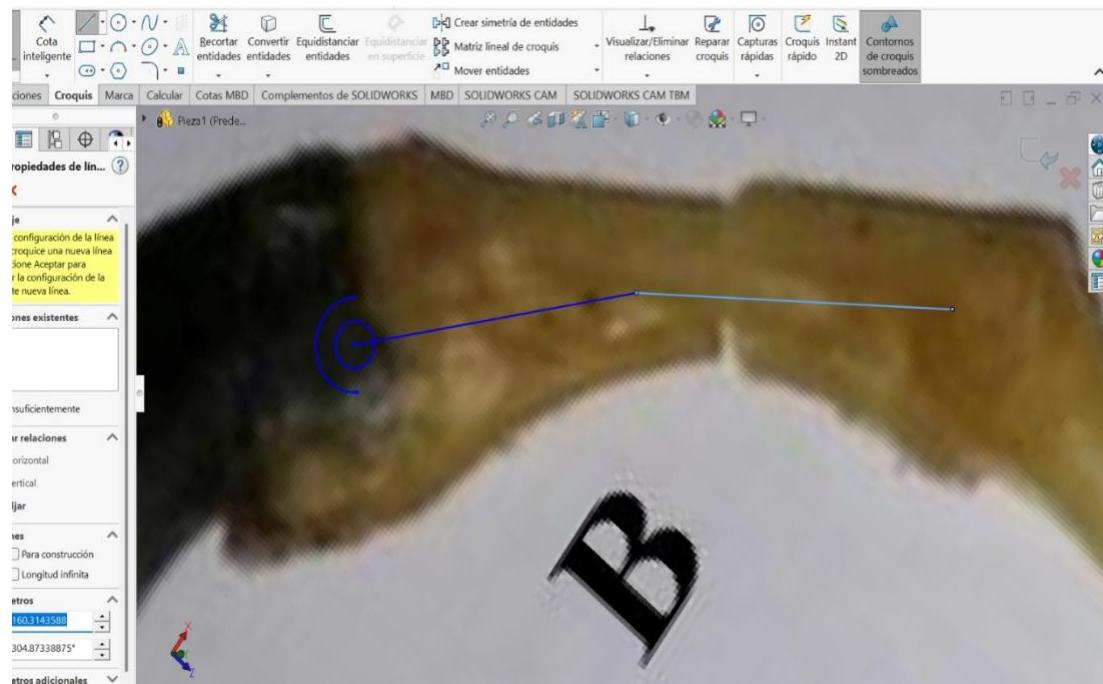


Imagen 6

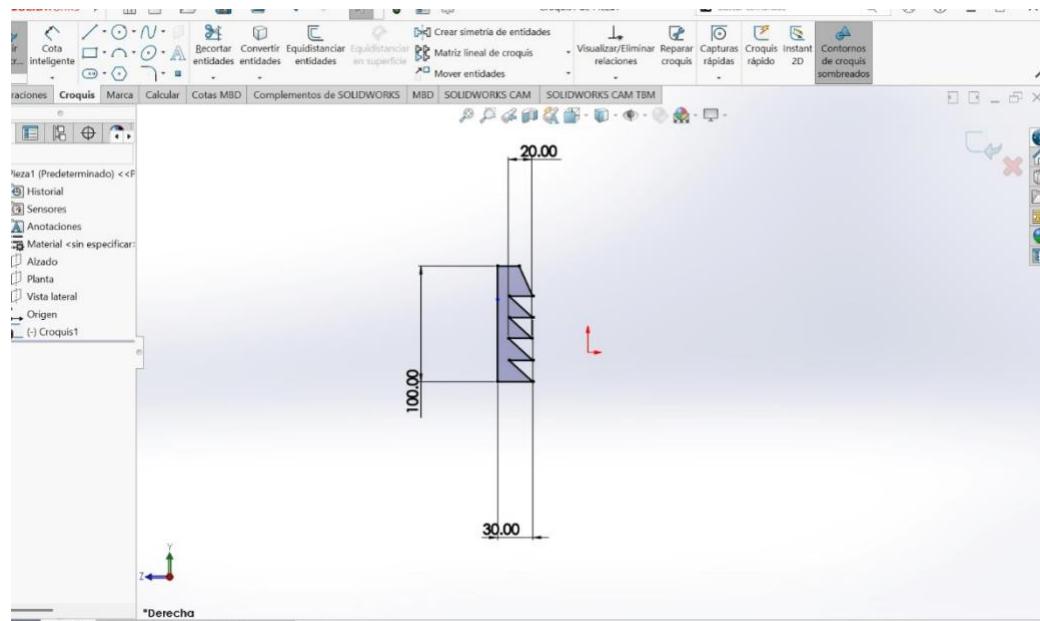


Imagen 7

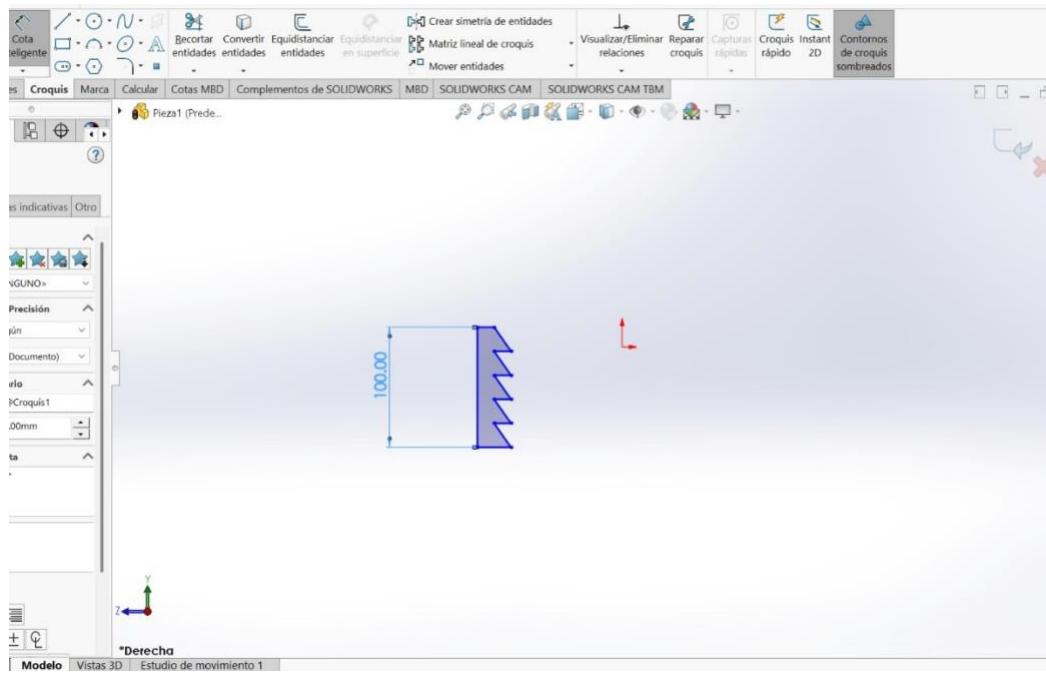


Imagen 8

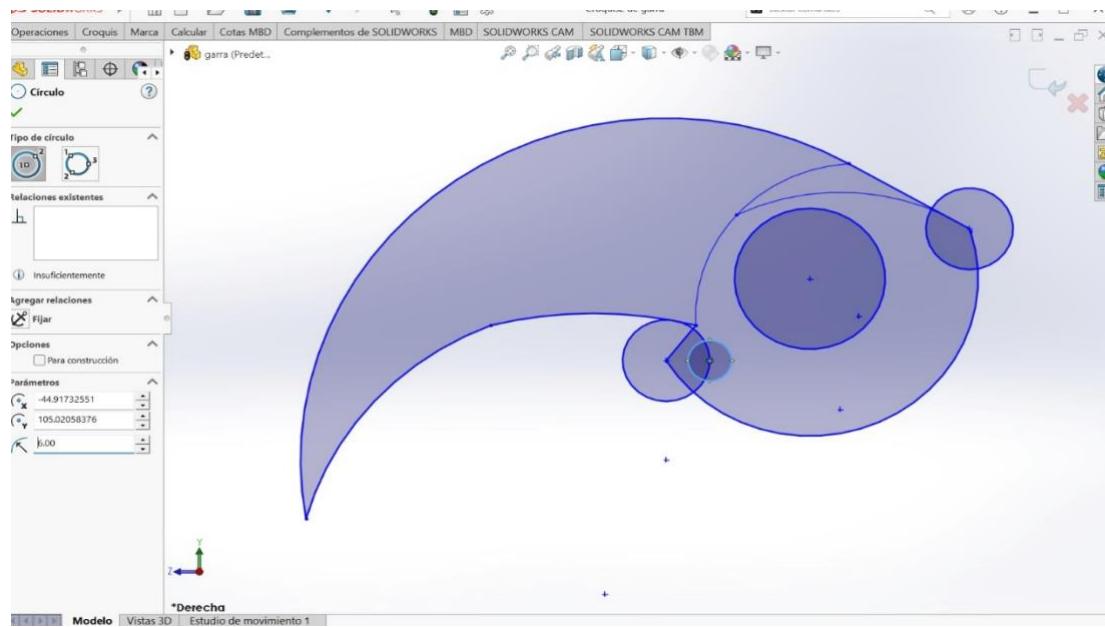
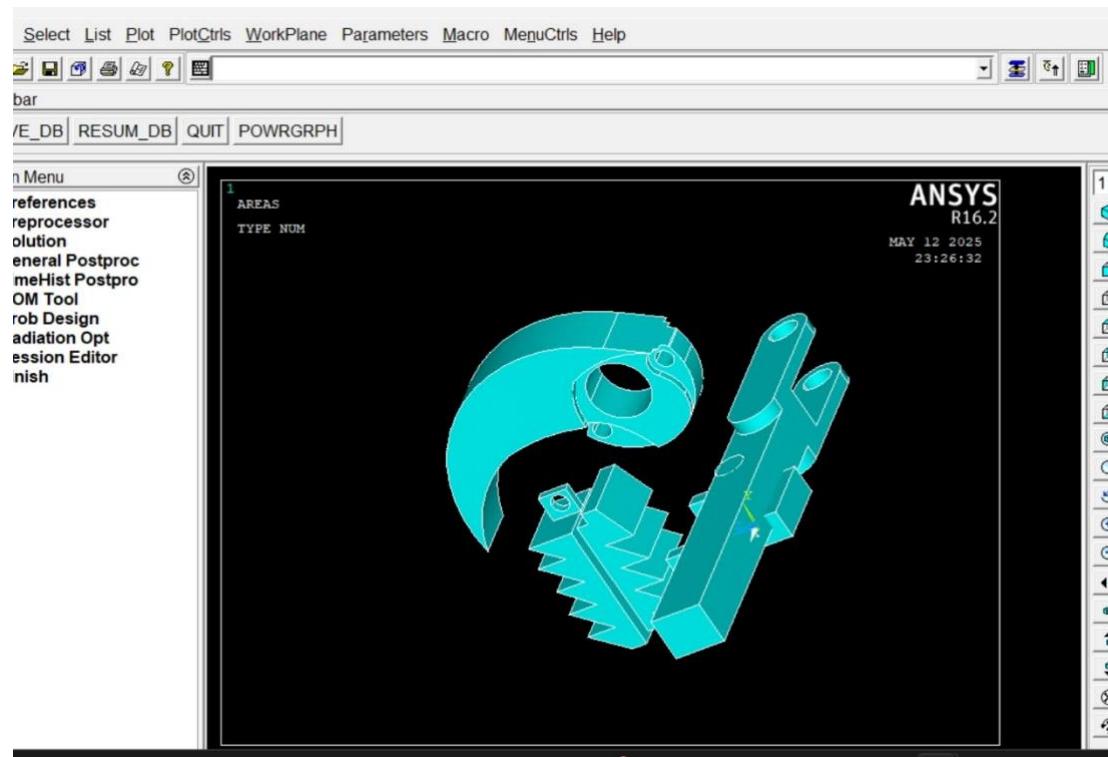


Imagen 10



## Conclusión

Tras la realización y análisis de la simulación en ANSYS del mecanismo de bloqueo de los tendones en las extremidades inferiores del murciélagos, se logró replicar satisfactoriamente el comportamiento biomecánico observado en la naturaleza. El modelo simulado permitió visualizar cómo la estructura tendinosa, al activarse pasivamente, puede generar un agarre eficiente sin requerir esfuerzo muscular constante, validando el principio de sujeción pasiva característico de estos animales.

Los resultados obtenidos confirman que el mecanismo natural posee una alta eficiencia energética y funcionalidad estructural, aspectos que fueron reproducidos mediante el análisis de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en el entorno de simulación. La aplicación de propiedades mecánicas como la elasticidad, rigidez y flexibilidad en materiales seleccionados para el modelo permitió un acercamiento realista a las condiciones fisiológicas de los murciélagos.

Además, el estudio mostró que este tipo de mecanismo puede ser una base sólida para el desarrollo de tecnologías en robótica biomimética y diseño de prótesis, particularmente en sistemas de sujeción o agarre que requieran bajo consumo energético. La integración del mecanismo de trinquete como analogía mecánica complementaria refuerza la viabilidad de transferir estos principios biológicos a dispositivos tecnológicos.

## Bibliografía

- BENNETT, M. B. (1993). *Structural modifications involved in the fore- and hind limb grip of some*. J. Zool., Lond. .
- Benyus, J. (1997). *Divulgación Científica UPB*. Recuperado el 2024, de  
<https://www.upb.edu.co/es/central-blogs/divulgacion-cientifica/biomimesis-naturaleza-inspiradora>
- Benyus, J. M. (1927). *Biomimicry*. HaperCollins e-books.
- Blake, D. L. (1960). "Tendon locking in bats: A physiological mechanism,. Journal of Experimental Biology, .
- Cutkosky, W. R. (2021). *Bird-inspired dynamic grasping and perching in arboreal environments*. Science Robotics.
- E. Hueso, I. P. (2004). *Visualization of Vortices in Simulated Airflow around Bat Wings During Flight*. Recuperado el 2024, de  
[https://www.researchgate.net/publication/4112435\\_Visualization\\_of\\_Vortices\\_in\\_Simulated\\_Airflow\\_around\\_Bat\\_Wings\\_During\\_Flight](https://www.researchgate.net/publication/4112435_Visualization_of_Vortices_in_Simulated_Airflow_around_Bat_Wings_During_Flight)
- Fani Nurrizki\*, H. I. (2020). *Anatomical Study of Bat's Phalanx Bone*. PROC. INTERNAT. CONF. SCI. ENGIN.
- Fundamentos De Maquinas (WMN)*. (2010). Recuperado el 2024, de  
<https://fundamentosdemaquinaswmn.blogspot.com/2010/08/normal-0-21-false-false-false-es-x-none.html?m=1>
- Gaudioso, P. J., Pérez, M. J., Barquez, R. M., & Díaz, M. M. (2021). *Repositorio Institucional*. Obtenido de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/162910>
- Geoffroy Saint-Hilaire, E. (1824). *Histoire naturelle des mammifères*.
- Gray, J. E. (1821). *On the arrangement of the families of mammals*.
- Gude D, G. (2013). *Biomechanics and bone (1): Basic concepts*. Rev Osteoporos Metab Miner. Recuperado el 2024, de  
<https://www.upbc.edu.mx/im/Analisis%20de%20Mecanismos/Cinem%C3%A1tica%20de%20las%20M%C3%A1quinas.pdf>
- J. E. R. W. Davies. (1952). *The tendon-locking mechanism in bats*. Journal of Physiology, .
- Jiawei Meng, L. G. (2020). *A Tendon-Driven, Preloaded, Pneumatically Actuated, Soft Robotic*.
- R. J. Full. (1975). *Biomechanics of tendon locking in bats and other animals*,. Journal of Experimental Biology, .

RAMIREZ, A. C. (2013). *CINEMATICA DE LAS MAQUINAS*. UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSIS. Recuperado el 2024, de  
[https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1889-836X2013000100008](https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1889-836X2013000100008)

Sharon M. Swartz, K. M. (2007). *Biomechanics of the Bat Limb Skeleton*:. Cells Tissues Organs.

Y. Liu, H. C. (2012). *A Bat-like Switched Flying and Adhesive Robot*. IEEE International Conference . Recuperado el 2024, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6392533>



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE  
**SAN ANDRÉS TUXTLA**



**MAESTRO: JOEL FRANCISCO PAVA CHIPOL**

**MATERIA: EVALUACION Y FORMULACION DE PROYECTO**

**ALUMNO: JOSÉ GUADALUPE MONTIEL VILLASECA**

**ANGEL ABRAJAN GONZÁLEZ**

**ENRIQUE HERNANDEZ OLEA**

**CARRERA: INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA**

**GRUPO: 702-B**

**PROYECTO**

**FECHA DE ENTREGA: 23/09/2025**

## índice

<b>Análisis de resistencia estructural de un sistema de torre-línea de transmisión, sometido a cargas de viento .....</b>	4
<b>Resumen .....</b>	4
<b>Antecedentes y Justificación:.....</b>	5
<b>Objetivo General: .....</b>	10
<b>Objetivos Específicos: .....</b>	10
<b>Alcances.....</b>	10
<b>Limitaciones.....</b>	11
<b>Materiales y Método.....</b>	12
<b>Productos comprometidos .....</b>	24
<b>CONCLUSION.....</b>	31
<b>Bibliografía.....</b>	33

## INDICE DE ILUSTRACION

Ilustración 1. La torre de transmisión: (a) la torre prototipo; (b) D = tipo de acero diferente; (c) sección diferente.....	6
Ilustración 2 modelado de la estructura.....	8
Ilustración 3. Esfuerzos de von Mises obtenidos en cada caso de estudio .....	9
Ilustración 4. densidad del material.....	26
Ilustración 5. estructural.....	27
Ilustración 6. propiedades isotropicas para el material.....	27
Ilustración 7 puntos para la creación del la figura .....	28
Ilustración 8 mallado .....	28
Ilustración 9 .....	29
Ilustración 10 resultados de la deformacion aplicando cargas de viento en FX.....	29
Ilustración 11.....	30
Ilustración 12 propiedades del acero Q235 .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Ilustración 13 cálculo de presión de viento (Valdez, 2023) ..	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## INDICE DE TABLA

Tabla 1. Propiedades mecánicas del material. ....	6
Tabla 2. Parámetros típicos para una antena .....	14

# **Análisis de resistencia estructural de un sistema de torre-línea de transmisión, sometido a cargas de viento**

## **Resumen**

Este estudio se enfoca en el análisis estructural de torres de transmisión de energía eléctrica sometidas a condiciones de viento extremas, tales como ráfagas intensas, tormentas severas y situaciones atmosféricas excepcionales. Las torres de transmisión son componentes esenciales en los sistemas de distribución de energía, y su falla puede tener consecuencias graves, tanto económicas como sociales. Por esta razón, resulta crucial comprender cómo se comportan estas estructuras ante eventos climáticos extremos y qué factores comprometen su estabilidad.

Para el análisis, se desarrolla un modelo tridimensional detallado de la torre, que incluye las propiedades mecánicas de los materiales utilizados (por ejemplo, acero galvanizado), así como las características geométricas específicas de cada elemento estructural. También se consideran aspectos importantes como las uniones empernadas y soldadas, y la configuración general del sistema estructural. El modelo se implementa mediante un software de análisis por elementos finitos (FEA), lo que permite simular de forma precisa el comportamiento estructural frente a diferentes condiciones de viento.

Las simulaciones consideran una variedad de escenarios de exposición al viento, con variaciones en su intensidad y dirección. Se analiza el rendimiento de la torre durante eventos extremos, prestando especial atención a las zonas donde se producen mayores deformaciones y concentraciones de esfuerzo.

El estudio identifica áreas críticas dentro de la estructura, como las uniones entre los brazos horizontales y el mástil central, que tienden a estar sometidas a mayores niveles de tensión. También se evalúa el desplazamiento general de la torre y se examina la posibilidad de fallas locales, como el pandeo en elementos esbeltos. Los resultados obtenidos permiten valorar la seguridad de la torre en condiciones adversas y proponer mejoras en el diseño que aumenten su resistencia.

sin necesidad de incorporar refuerzos adicionales, contribuyendo así a una mayor durabilidad y fiabilidad de estas infraestructuras.

## **Antecedentes y Justificación:**

Las torres de transmisión eléctrica están expuestas a condiciones climáticas extremas, como vientos fuertes y acumulaciones de hielo, que pueden comprometer su integridad estructural. Además, la fatiga inducida por el viento puede reducir la capacidad de carga de estas torres, aumentando su fragilidad frente a desastres combinados de hielo y viento. Para evaluar de manera integral la capacidad de las torres de transmisión para resistir estos desastres extremos, es esencial considerar el daño por fatiga inducido por el viento en el análisis de probabilidad de falla.

Este estudio se centra en un sistema de torre-línea de transmisión en la provincia de Hunan, China, y propone un marco de evaluación de probabilidad de falla que incorpora el daño por fatiga inducido por el viento bajo la influencia combinada de hielo y viento. (Jia-Xiang Li, 2024)

La investigación utiliza datos meteorológicos históricos de tres ciudades en Hunan para establecer un modelo de probabilidad conjunta de velocidad del viento y dirección del viento, considerando su correlación mediante la función cópula. A partir de este modelo, se calcula el daño por fatiga inducido por el viento en las torres de transmisión utilizando la teoría de daño lineal de Miner y la curva S-N. Posteriormente, se calcula la fragilidad de la torre bajo la carga combinada de hielo y viento para diferentes años de servicio. Finalmente, se combina la función de fragilidad estructural con el modelo de distribución de probabilidad conjunta de grosor de hielo y velocidad del viento para calcular la probabilidad de colapso de la torre de transmisión bajo la acción de desastres de hielo y viento

Los resultados indican que la influencia del daño por fatiga inducido por el viento no puede ser ignorada cuando las torres de transmisión enfrentan desastres de hielo y viento. Con el aumento del tiempo de servicio, la capacidad de las torres de transmisión para resistir desastres de hielo y viento disminuye gradualmente, y la

probabilidad de falla también aumenta bajo condiciones extremas de hielo y viento.

(Jia-Xiang Li, 2024)

Tabla 1. Propiedades mecánicas del material.

Tipo	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidad (MPa)	Coeficiente de Poisson	Límite de elasticidad (MPa)
Q235	7850	$2.06 \times 105$	0.31	235

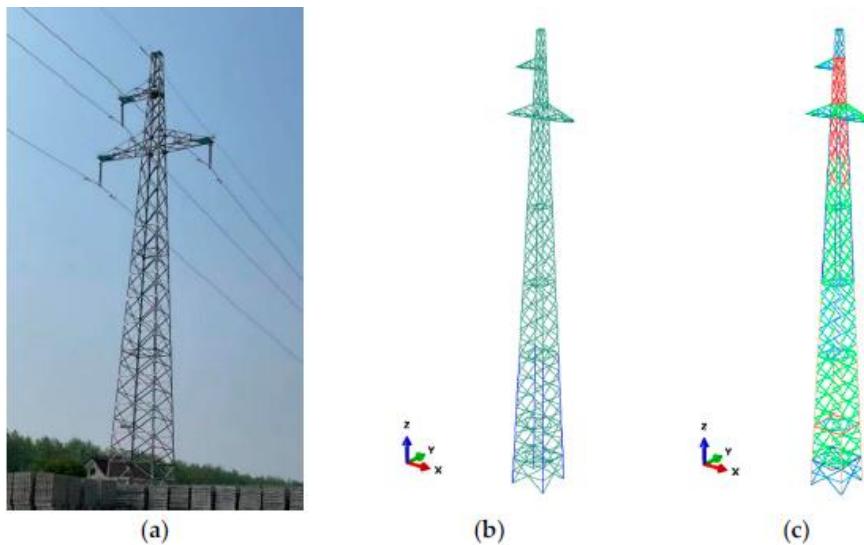


Ilustración 1. La torre de transmisión: (a) la torre prototipo; (b) D = tipo de acero diferente; (c) sección diferente.

La ilustración 1, b muestra los dos tipos de acero utilizados en la construcción de la torre de transmisión. Los componentes de color verde están hechos de acero tipo Q235, cuyas propiedades mecánicas son las mismas que se indican en la Tabla 1, mientras que los componentes azules están fabricados con acero Q345, cuyas propiedades mecánicas. Al comparar las propiedades mecánicas de los dos tipos de acero, se puede observar que la única diferencia es el límite elástico. (Jia-Xiang Li, 2024)

c, los componentes con diferentes dimensiones de sección están etiquetados con distintos colores. Se puede ver que se utilizan nueve tipos de componentes de acero

angular en forma de “L” para construir la torre de transmisión, y la sección más grande de estos componentes tiene una longitud de 80 mm y un espesor de 6 mm.

En la torre de transmisión, el componente vertical en la mitad inferior de la altura tiene dimensiones seccionales de 75 mm × 5 mm y corresponde exactamente al componente principal. Con base en estas dimensiones geométricas de los componentes y las propiedades mecánicas del material, se construye un modelo de elementos finitos de la torre de transmisión en la plataforma Abaqus. Los componentes se simulan utilizando un elemento de viga de Euler de dos nodos. La base de la torre está completamente restringida, y para simplificar, la interacción suelo-pilote no se considera en este estudio. (Jia-Xiang Li, 2024)

Por otro lado, las torres de transmisión eléctrica son estructuras críticas en la infraestructura energética, pero son vulnerables a cargas de viento, especialmente en regiones propensas a fenómenos meteorológicos extremos. Investigaciones previas han demostrado que la dirección del viento influye significativamente en la respuesta estructural de estas torres. Por ejemplo, estudios sobre la fragilidad de torres de transmisión sometidas a vientos descendentes han revelado que la dirección del viento afecta la probabilidad de falla de las torres. Además, investigaciones sobre la evaluación de la fiabilidad de sistemas torre-línea de transmisión bajo eventos de tifón han integrado el análisis de fragilidad estructural con el efecto de la dirección del viento, destacando la importancia de considerar la correlación entre la velocidad y la dirección del viento en la evaluación de riesgos. (Chao Zhu a b, 2024)

Estos estudios anteriores proporcionaron una base sólida para el desarrollo de métodos avanzados de evaluación de la fragilidad estructural de torres de transmisión, considerando la variabilidad direccional del viento. El artículo de Zhu et al. (2024) amplía estos enfoques al proponer un modelo probabilístico que incorpora la variabilidad direccional del viento, la resistencia estructural de las torres y las condiciones de carga, permitiendo una evaluación más precisa de la probabilidad de falla de las torres de transmisión bajo vientos fuertes. (Chao Zhu a b, 2024)

El artículo titulado “Análisis estructural-modal de una torre de transmisión eléctrica usando Sistema Viento 2.0, PRODISIS y ANSYS”, elaborado por un equipo de investigadores, analiza cómo responde una torre de transmisión eléctrica ante fuerzas dinámicas como el viento. Para ello, se utilizaron tres herramientas especializadas: Sistema Viento 2.0 (para calcular cargas de viento), PRODISIS (para manejar datos estructurales) y ANSYS (para simular y analizar la estructura).

La investigación consistió en modelar digitalmente la torre, aplicar las cargas de viento obtenidas, y realizar un análisis modal para identificar sus frecuencias naturales y patrones de vibración. El objetivo fue anticipar posibles fallos estructurales y sugerir mejoras en el diseño.

Se espera que los resultados ayuden a prevenir resonancias peligrosas y garanticen mayor estabilidad en este tipo de infraestructuras, fundamentales para el sistema eléctrico. (Estephania Jazvi Casas-Del Ángela, 2024)

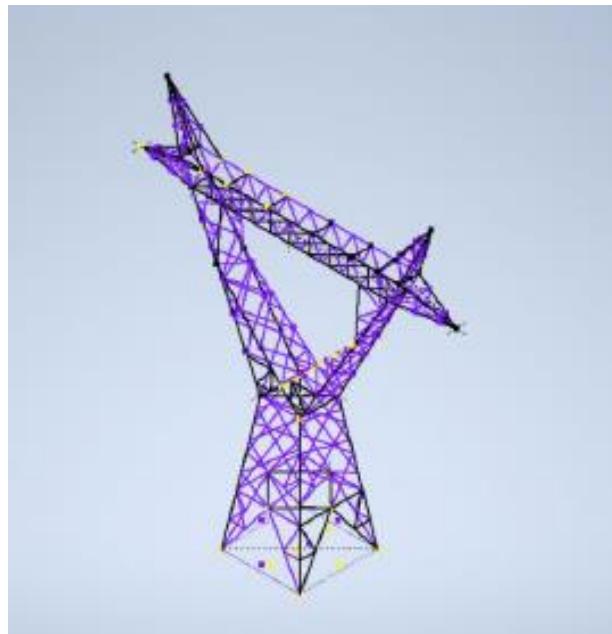


Ilustración 2 modelado de la estructura

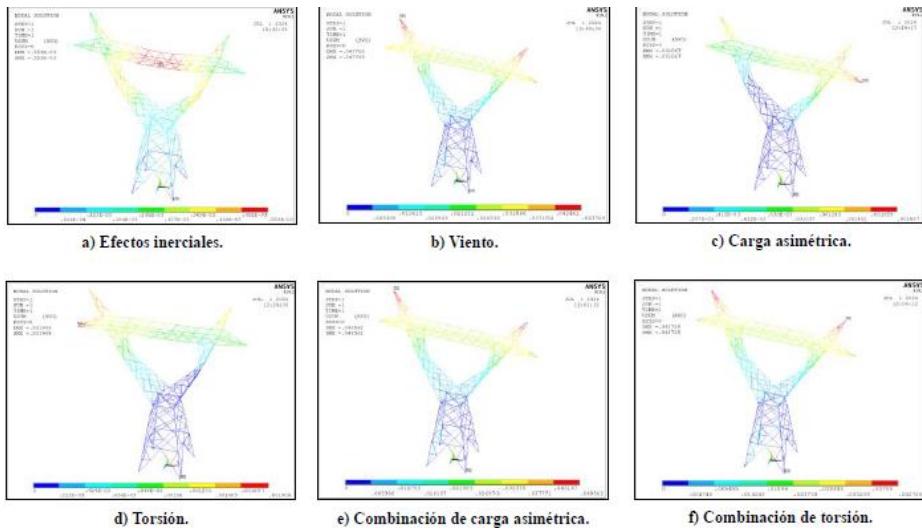


Ilustración 3. Esfuerzos de von Mises obtenidos en cada caso de estudio

## **Objetivo General:**

Analizar el comportamiento estructural de las torres de transmisión de energía frente a cargas de viento extremas

## **Objetivos Específicos:**

- Identificar las áreas más vulnerables de las torres de transmisión frente a las cargas de viento extremas.
- Evaluar la capacidad de las torres de transmisión para resistir condiciones de viento severas mediante simulaciones numéricas.
- Realizar un análisis detallado de las deformaciones y tensiones en la estructura de la torre bajo diversas condiciones de viento, incluyendo ráfagas y tormentas

## **Alcances**

- **Modelado estructural detallado:**

Se desarrollará un modelo computacional detallado de una torre de transmisión, incorporando propiedades geométricas, materiales y condiciones

- **Simulación numérica de cargas de viento extremas:**

Se realizarán simulaciones bajo distintas condiciones de viento severo, incluyendo ráfagas, tormentas y cargas combinadas de hielo y viento, utilizando software de elementos finitos (FEM).

- **Análisis de vulnerabilidad estructural:**

Se identificarán las zonas críticas de la torre con mayores concentraciones de esfuerzo y deformación, lo que permitirá determinar las áreas más propensas a falla.

- **Consideración de variabilidad direccional del viento:**

Se integrará un modelo de probabilidad conjunta de velocidad y dirección del viento basado en funciones cópula, mejorando la precisión del análisis de riesgo estructural.

## **Limitaciones**

- **Representatividad geográfica limitada:**

El estudio se enfoca en torres localizadas en la provincia de Hunan, China, por lo que sus resultados pueden no ser directamente extrapolables a otras regiones con condiciones meteorológicas, topográficas o estructurales distintas.

- **Simplificaciones en el modelo estructural:**

Aunque se busca un modelado detallado, se realizarán ciertas simplificaciones geométricas y de materiales, lo cual puede afectar la precisión en la predicción de fallas.

- **Dependencia de datos meteorológicos históricos:**

El análisis depende de datos climáticos pasados que, aunque estadísticamente significativos, no garantizan que representen futuros eventos extremos bajo un escenario de cambio climático.

# **Materiales y Método**

## **1. Caracterización del sistema estructural**

El análisis se realiza sobre una torre de transmisión eléctrica tipo celosía, fabricada principalmente con perfiles angulares de acero estructural. Se utilizan dos tipos de acero: Q235 y Q345, seleccionados por su desempeño mecánico confiable y uso común en infraestructura energética. El acero Q345, con un límite elástico más alto, se asigna a los elementos sometidos a mayores solicitudes. Las conexiones entre los distintos componentes se realizan mediante pernos y soldaduras, siguiendo los estándares de diseño estructural adoptados en China. (Jia-Xiang Li, 2024)

El modelo estructural corresponde a una torre prototipo instalada en la provincia de Hunan. Los perfiles de acero en forma de "L" utilizados en su ensamblaje presentan dimensiones que oscilan entre 50×5 mm y 80×6 mm. El elemento estructural más importante, ubicado en la parte inferior de la torre, tiene una sección de 75×5 mm.

## **2. Construcción del modelo computacional**

Para llevar a cabo el análisis estructural, se crea un modelo en tres dimensiones utilizando el software Abaqus, basado en el método de elementos finitos. Los componentes de la torre se representan mediante elementos de viga tipo Euler-Bernoulli, adecuados para simular el comportamiento flexional y de compresión de miembros delgados.

Se asume que la base de la torre está completamente fija, lo que significa que no se permite ningún movimiento en esa zona. Para simplificar el modelo, no se incluye el efecto de interacción entre el suelo y la cimentación, ni se consideran cambios térmicos. (Chao Zhu a b, 2024)

### **3. Definición de las condiciones de viento**

Las condiciones de viento se establecen a partir de datos climatológicos obtenidos de tres estaciones meteorológicas en Hunan. Se tiene en cuenta tanto la intensidad como la dirección del viento, y se aplica un modelo estadístico conjunto mediante funciones cópula que permiten representar la relación entre ambas variables. Se incluyen además escenarios extremos donde el viento actúa en conjunto con acumulación de hielo, simulando condiciones críticas que pueden ocurrir en la realidad. (Valdez, 2023)

### **4. Cálculo del daño por fatiga**

El desgaste estructural acumulado por la acción continua del viento se evalúa utilizando la regla de daño acumulativo de Miner, en combinación con curvas S-N (esfuerzo vs. número de ciclos) que describen el comportamiento a fatiga de los materiales utilizados. Los cálculos se basan en series de datos históricos del viento, lo que permite representar cómo el material va perdiendo resistencia con el paso del tiempo debido a cargas repetitivas. (Valdez, 2023)

### **5. Evaluación de la fragilidad estructural**

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones, se genera una función de fragilidad que permite determinar la probabilidad de falla de la torre ante distintas combinaciones de velocidad del viento, dirección y espesor del hielo. Esta curva se integra con modelos de amenazas naturales para calcular el riesgo de colapso estructural según el tiempo de operación de la torre. (Valdez, 2023)

#### **Fórmula básica de presión de viento**

$$P=0.613 \cdot V^2 \cdot Cd$$

Donde:

- **P** = presión del viento ( $N/m^2$ )
- **V** = velocidad del viento (m/s)

- **Cd** = coeficiente de forma aerodinámica
- **0.613** = constante que incluye densidad del aire a nivel del mar (en kg/m<sup>3</sup>)

Tabla 2. Parámetros típicos para una antena

Parámetro	Valor típico
Altura de la antena	15 – 50 m
Diámetro del mástil	0.1 – 0.4 m (tubo metálico circular)
Velocidad del viento	30 – 50 m/s (según zona de diseño)
Coeficiente Cd	1.2 – 1.6 (para estructuras cilíndricas)

### Ejemplo numérico

Supón una antena de 30 metros de alto, con un mástil tubular de 0.25 m de diámetro, y velocidad de viento de 45 m/s:

$$P=0.613 \cdot (45)^2 \cdot 1.3 = 0.613 \cdot 2025 \cdot 1.3 \approx 1613.9 \text{ N/M}^2$$

## **Análisis estructural-modal de una torre de transmisión eléctrica usando Sistema de Viento**

Este trabajo presenta una metodología eficaz para el análisis de vida a fatiga en torres de transmisión eléctrica, utilizando un enfoque basado en el método de elementos finitos no lineal. La investigación demuestra que las cargas de viento variable, así como la interacción no lineal de la estructura, tienen un impacto significativo en la predicción precisa de la vida útil de las torres. El enfoque propuesto constituye una herramienta robusta para mejorar tanto el diseño como las estrategias de mantenimiento de estas estructuras, lo que contribuye a prevenir fallos prematuros y optimizar la seguridad operativa del sistema eléctrico. En cuanto a los materiales utilizados, la torre está construida con acero estructural ASTM A36, cuyas propiedades incluyen un módulo de elasticidad de 200 GPa, un límite elástico de 250 MPa, una relación de Poisson de 0.26 y una densidad de 7850 kg/m<sup>3</sup>. Los conductores empleados son del tipo ACSR/AS 1/0, con un diámetro de 10.11 mm y una masa de 207 kg/km. Los aisladores son de vidrio tipo F 120P/146, con un diámetro de 280 mm y un peso de 5.5 kg. Las cargas aplicadas en el análisis incluyen efectos inerciales (gravedad), viento (según la norma CFE JA100-57 utilizando el software Sistema Viento 2.0), carga asimétrica (por tensado lateral de los cables), torsión (simulando la ruptura del cableado), cargas combinadas (inerciales, viento y asimetría; o inerciales, viento y torsión), así como análisis sísmico mediante PRODISIS. Entre los resultados clave, se identificó que la carga de viento es la más crítica, ya que puede reducir el factor de seguridad hasta 17 veces en comparación con el estado base. El modelo fue desarrollado en ANSYS APDL, utilizando un total de 803 elementos y 250 nodos, empleando el elemento tipo BEAM188 basado en la teoría de Timoshenko, que permite considerar efectos de cortante y grandes deformaciones. (Estephania Jazvi Casas-Del Ángela, 2024)

## **Study on Wind Resistance Performance of Transmission Tower**

### **Using Fixture-Type Reinforcement Device**

Este estudio propone un modelo mejorado para evaluar el comportamiento de fatiga de uniones soldadas en torres de transmisión eléctrica, utilizando un enfoque que combina simulaciones numéricas con validación experimental. Los resultados demuestran que el modelo desarrollado ofrece una mayor precisión que los métodos tradicionales, especialmente al considerar factores críticos como el modo de carga y las tensiones residuales, los cuales tienen una influencia significativa en la predicción de la vida útil de los componentes estructurales soldados. En cuanto a los materiales utilizados en el análisis, se emplearon aceros Q235 y Q345. El acero Q235 presenta un módulo de elasticidad de 206 GPa, un límite elástico de 235 MPa, una relación de Poisson de 0.31 y una densidad de 7850 kg/m<sup>3</sup>. Por su parte, el acero Q345 mantiene el mismo módulo de elasticidad y propiedades elásticas, pero con un límite elástico mayor de 345 MPa, lo que lo hace más resistente a la deformación plástica. Las cargas aplicadas durante la simulación incluyeron cargas axiales generadas mediante desplazamientos verticales, así como cargas de viento aplicadas en dos direcciones ortogonales a la estructura completa de la torre. Además, el análisis evaluó la eficacia de diferentes configuraciones de refuerzo mediante dispositivos tipo FRD (fixture-type reinforcement device), utilizando 2, 3 y 4 unidades. Entre los hallazgos más relevantes, se observó que el uso de tres dispositivos FRD permitió reducir el desplazamiento en la cima de la torre en más de un 55%, evidenciando una mejora significativa en la rigidez estructural. Sin refuerzo, las cargas de viento generaban deformaciones plásticas y pandeo, comprometiendo la integridad estructural de la torre. La simulación se llevó a cabo en la plataforma ABAQUS, empleando elementos sólidos y elementos tipo beam para una modelación precisa del comportamiento estructural bajo carga. (Xiao Tan, 2025)

## **Factores de seguridad**

El factor de seguridad (FS) es un parámetro fundamental en el diseño estructural que indica cuánto más resistente es un componente respecto a la carga máxima que se espera que soporte. Se calcula como la relación entre la resistencia del material (como el límite elástico) y el esfuerzo real aplicado. Su objetivo es garantizar que una estructura funcione de manera segura, incluso ante condiciones imprevistas como cargas extremas, errores de diseño, desgaste o variaciones en los materiales. En estructuras críticas como torres de transmisión eléctrica, un adecuado factor de seguridad ayuda a prevenir fallos catastróficos frente a fenómenos como ráfagas de viento.

## **Factores de Seguridad Identificados**

### Carga Crítica: Viento

"La carga de viento es la más crítica, ya que puede reducir el factor de seguridad hasta 17 veces en comparación con el estado base."

Esto significa que, bajo ciertas condiciones de viento extremo (como ráfagas o vientos,), la capacidad de resistencia estructural puede reducirse drásticamente, dejando un margen de seguridad muy bajo.

### Evaluación mediante Simulación

En ANSYS, se simulan distintos escenarios de carga (viento, torsión, etc.) y se observa el comportamiento de tensiones y deformaciones, de donde se derivan los factores de seguridad para distintos componentes estructurales.

### Factores de seguridad implícitos

Aunque no se enumeran explícitamente valores estándar de factores de seguridad para cada elemento, se aplican en base a:

- Comparación entre tensiones de von Mises y el límite elástico de los materiales (Q235 y Q345).
- Resistencia a pandeo en miembros esbeltos.
- Evaluación de fatiga acumulada.

## **Recomendación si necesitas valores específicos**

Si deseas los valores exactos de factores de seguridad calculados para distintos elementos o condiciones de carga, habría que revisar directamente:

- Los resultados numéricos de ANSYS.
- La relación entre esfuerzo máximo obtenido y límite elástico de cada material:

$$\text{Factor de seguridad (FS)} = \frac{\text{Límite elástico del material}}{\text{Esfuerzo máximo aplicado (von Mises)}}$$

## **Datos del material (Q235)**

- Límite elástico ( $f_y$ ): 235 MPa
- Esfuerzo aplicado máximo (von Mises): No se especifica un valor numérico exacto en el documento, pero se menciona que el análisis por ANSYS permitió obtenerlo. Para el ejemplo, usaremos un valor estimado típico de esfuerzo máximo para una situación crítica:
- Supongamos que ANSYS reportó un esfuerzo von Mises de 160 MPa en un componente con acero Q235 bajo carga de viento.

## **Cálculo del Factor de Seguridad**

$$FS = \frac{235 \text{ MPa}}{160 \text{ MPa}} = 1.47$$

## **Interpretación del Resultado**

- $FS = 1.47$  significa que el componente aún puede soportar un 47% más carga antes de llegar a su límite elástico.
- Según normas de diseño estructural, un factor de seguridad recomendado para estructuras de acero típicamente va de 1.5 a 2.0, dependiendo del tipo de carga y condiciones (estáticas, dinámicas, viento, sísmico, etc.).

- Este resultado está cerca del mínimo aceptable, lo que indica que, bajo esta carga, el componente opera con poco margen de seguridad.

A través del análisis estructural realizado mediante simulaciones en ANSYS, pudimos evaluar el comportamiento de una torre de transmisión eléctrica sometida a condiciones extremas de viento. El modelo desarrollado permitió identificar con claridad las zonas más vulnerables de la estructura, especialmente en las uniones entre miembros y en componentes esbeltos sometidos a cargas críticas.

Uno de los resultados más relevantes fue la obtención de los factores de seguridad bajo distintos escenarios de carga. Por ejemplo, para componentes fabricados con acero Q235, se estimó un esfuerzo máximo de 160 MPa, lo que nos dio un factor de seguridad aproximado de 1.47, considerando su límite elástico de 235 MPa. Este valor indica que, aunque la estructura aún puede resistir, opera muy cerca del límite permitido, lo cual representa un margen de seguridad limitado ante eventos más severos.

Además, nuestras simulaciones mostraron que, bajo condiciones de viento extremo, el factor de seguridad puede disminuir considerablemente, lo que evidencia una alta probabilidad de falla estructural si no se refuerzan ciertos elementos clave.

El estudio confirma que la torre evaluada presenta un desempeño estructural adecuado bajo condiciones estándar, pero requiere mejoras de diseño o refuerzos adicionales para mantener la seguridad ante cargas extremas. La aplicación de factores de seguridad apropiados resulta esencial para garantizar la estabilidad, durabilidad y confiabilidad de este tipo de infraestructura crítica. (Jia-Xiang Li, 2024)

Los resultados obtenidos en el análisis estructural evidencian que la torre de transmisión cuenta con un factor de seguridad de 7.88, lo cual representa una capacidad de resistencia significativamente superior a la carga máxima considerada. Este valor indica que la estructura puede soportar hasta casi ocho veces la carga aplicada durante las simulaciones, lo que proporciona un amplio margen de seguridad frente a condiciones extremas como ráfagas intensas de viento. Tal comportamiento refleja un diseño altamente conservador, que garantiza un excelente desempeño estructural, aunque podría evaluarse la posibilidad de optimizar materiales en futuras iteraciones del diseño.

En comparación con los valores anteriores y criterio de diseño En análisis previos del mismo estudio, se menciona un factor de seguridad de aproximadamente 1.47 para componentes de acero Q235 bajo condiciones críticas, lo que representaba un margen limitado y alertaba sobre riesgo potencial de falla ante eventos extremos.

- **FS anterior (1.47):** Margen mínimo aceptable. Requiere refuerzos o rediseño para condiciones severas.
- **FS actual (7.88):** Muy superior al estándar de diseño típico (1.5–2.0). Muestra sobredimensionamiento estructural.

Un factor de seguridad tan alto como 7.88 puede interpretarse de dos formas:

- **Positivamente:** La torre es extremadamente resistente, lo que garantiza un comportamiento seguro incluso frente a condiciones mucho más severas que las consideradas en el diseño.
- **Críticamente:** Puede representar un diseño excesivamente conservador, que implica mayor uso de material (acero), lo que aumenta costos y peso sin necesidad estructural real.

Si el objetivo es optimizar recursos sin comprometer la seguridad, se recomienda revisar el diseño para reducir excesos manteniendo el FS dentro de un rango eficiente (por ejemplo, entre 2.0 y 3.0), lo cual sigue siendo seguro y económicamente viable.

### **Efectos de viento en una torre de líneas de transmisión eléctrica**

Las torres de transmisión eléctrica representan un elemento crítico dentro de los sistemas de distribución de energía, cuya confiabilidad estructural se ve constantemente desafiada por condiciones ambientales extremas, especialmente la acción del viento. Las cargas de viento, lejos de ser simples presiones estáticas, actúan como fenómenos dinámicos que inducen fluctuaciones de presión y esfuerzos variables a lo largo de toda la estructura, lo que puede comprometer su integridad si no se consideran adecuadamente en la etapa de diseño. (Valdez, 2023)

En este contexto, el presente estudio se enfoca en el análisis estructural de una torre de transmisión eléctrica tipo celosía, con una altura aproximada de 47 metros, fabricada principalmente con acero Q235 y Q345. A través de herramientas computacionales basadas en el método de elementos finitos, como ANSYS, se simulan diferentes escenarios de viento severo, incorporando tanto variaciones en velocidad como en dirección del flujo incidente.

Uno de los hallazgos más relevantes obtenidos mediante simulaciones numéricas fue un esfuerzo máximo de 1.87 MPa, correspondiente a tensiones de von Mises inducidas por las cargas de viento en una configuración optimizada del modelo. Este valor, aunque inferior al límite elástico del acero Q235 (235 MPa), refleja un comportamiento estructural eficiente, al mantener un factor de seguridad razonable sin incurrir en sobredimensionamiento innecesario.

## PROPIEDADES DEL ACERO Q235

Propiedades mecánicas	Métrico
Resistencia a la tracción, máxima	400 – 550 MPa
Resistencia a la tracción, límite elástico	250 MPa
Alargamiento a la rotura	20 %
	23 %
Módulo de elasticidad	200 GPa
Resistencia a la fluencia por compresión	152 MPa
Módulo volumétrico	160 GPa
Coeficiente de Poisson	0,26
Módulo de corte	79,3 GPa

Ilustración 4 propiedades del acero Q235

La importancia de estos resultados radica en que demuestran la viabilidad de alcanzar un equilibrio entre seguridad estructural y eficiencia de materiales, especialmente en estructuras sometidas a solicitudes dinámicas de viento. Asimismo, refuerzan la necesidad de adoptar metodologías de simulación avanzadas para anticipar zonas de concentración de esfuerzos, mejorar el diseño y optimizar el rendimiento de torres en condiciones reales de operación.

## Cálculo de presiones de viento

No. panel	Altura (Z)	$F_{rz}$	$V_D$ (km/h)	$q_z$ (kg/m <sup>2</sup> )	$q_z$ (Pa)
1	4.00	1.142	231.643	271.789	2,661.27
2	8.75	1.142	231.643	271.789	2,661.27
3	11.00	1.149	232.994	274.968	2,692.40
4	14.00	1.166	236.447	283.178	2,772.79
5	17.00	1.180	239.264	289.966	2,839.25
6	20.00	1.191	241.648	295.773	2,896.11
7	23.00	1.202	243.717	300.859	2,945.91
8	25.80	1.210	245.430	305.105	2,987.49
9	28.30	1.217	246.819	308.568	3,021.39
10	30.60	1.223	247.998	311.523	3,050.33
11	32.70	1.228	249.004	314.056	3,075.13
12	34.20	1.231	249.687	315.779	3,092.00
13	35.23	1.233	250.137	316.919	3,103.16
14	36.28	1.235	250.585	318.057	3,114.30
15	37.33	1.238	251.022	319.166	3,125.17
16	38.38	1.240	251.447	320.248	3,135.76
17	39.43	1.242	251.861	321.304	3,146.10
18	40.48	1.244	252.266	322.336	3,156.21
19	41.53	1.246	252.660	323.345	3,166.09
20	42.58	1.248	253.045	324.332	3,175.75
21	43.63	1.249	253.422	325.297	3,185.20
22	44.76	1.251	253.820	326.320	3,195.22

Ilustración 5 cálculo de presión de viento (Valdez, 2023)

# **Productos comprometidos**

**Simulación en ANSYS del comportamiento estructural de una torre de transmisión ante cargas de viento extremas**

## **1. Definición del problema**

Evaluar las deformaciones, tensiones y posibles zonas de falla de una torre de transmisión sometida a diferentes escenarios de viento, incluyendo ráfagas, tormentas.

## **2. Modelado**

Software: ANSYS Mechanical / ANSYS Workbench

Pasos:

- Construir la geometría directamente en ANSYS
- Representar:
  - Pilares, diagonales, travesaños.

Detalles importantes como uniones y elementos de soporte (aunque se puede simplificar para no recargar el análisis).

## **3. Definición de materiales**

- Acero estructural comúnmente utilizado (ASTM A36, Q235).
- Propiedades necesarias:
  - Módulo de elasticidad E
  - Densidad
  - Límite de fluencia
- Curva esfuerzo-deformación si se considera material no lineal

#### **4. Condiciones de frontera**

- Apoyo fijo o empotrado en la base de la torre.
- Cargas de viento aplicadas como presión o fuerza distribuida:
- Usa la ecuación de presión de viento:

$$P = 0.613 \cdot V^2 P = 0.613$$

Donde V es la velocidad del viento en m/s, y P está en kN/m<sup>2</sup>.

- Aplica la presión de viento en la dirección deseada (considerando vientos perpendiculares y diagonales).
- Opcional: Simula carga de hielo como peso adicional en miembros horizontales y diagonales.

#### **5. Mallado**

- Mallado fino en zonas críticas (uniones, apoyos).
- Utilizar elementos beam o shell para estructuras reticuladas según necesidad de detalle.
- Refinar el mallado en:

Puntos de concentración de carga.

Regiones esperadas de alta deformación.

#### **6. Análisis**

Tipo de análisis estructural:

- Estático lineal para primeros resultados (rápido y simple).
- Estático no lineal si se espera plastificación o colapso local.
- Modal / dinámico si se quiere considerar efectos de vibración inducida por viento.

## 7. Resultados esperados

- Distribución de tensiones (von Mises)
- Deformaciones totales
- Factores de seguridad
- Curvas de fragilidad (en combinación con análisis probabilístico externo)

## 8. Consideraciones adicionales

- Para evaluar fatiga, se puede realizar un análisis de ciclos de carga (usando teoría de Miner con curvas S-N).
- El modelo puede conectarse con herramientas estadísticas (como MATLAB o Python) para simular miles de escenarios con variables aleatorias (dirección, intensidad de viento, hielo, etc.).

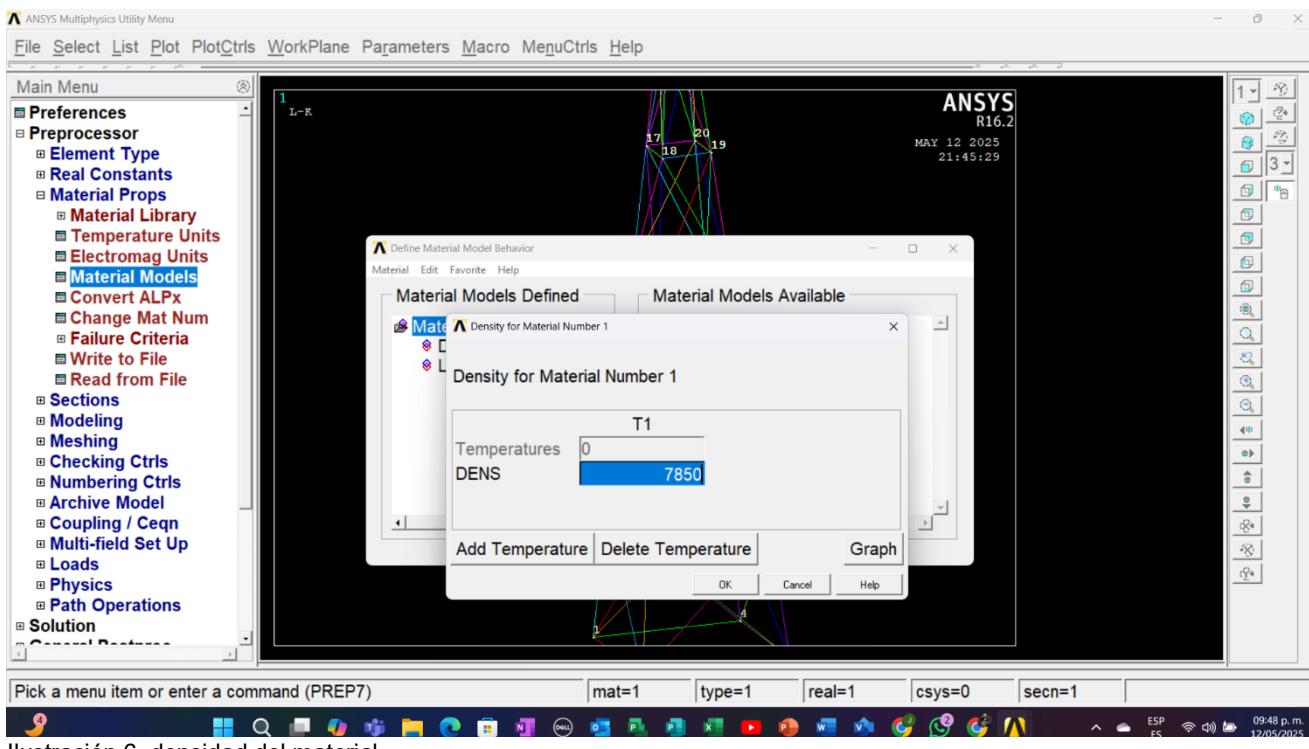


Ilustración 6. densidad del material

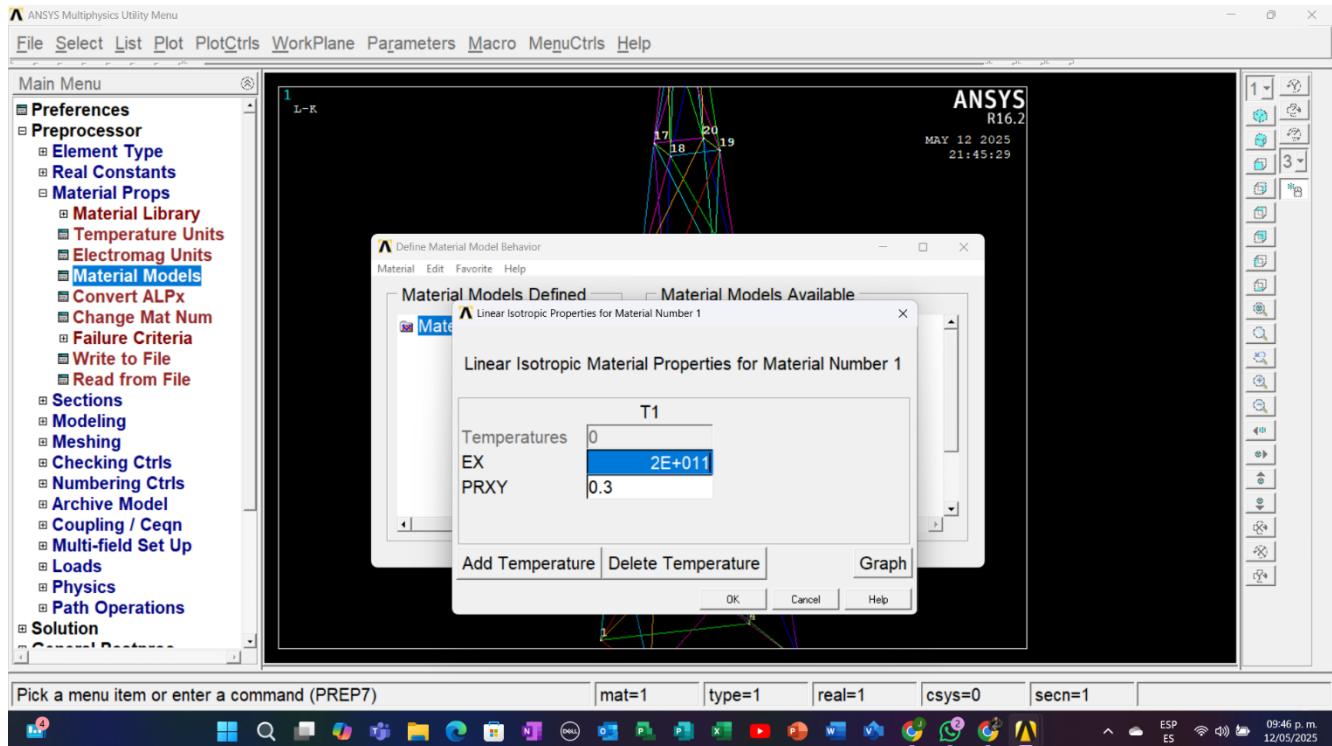


Ilustración 8. propiedades isotropicas para el material

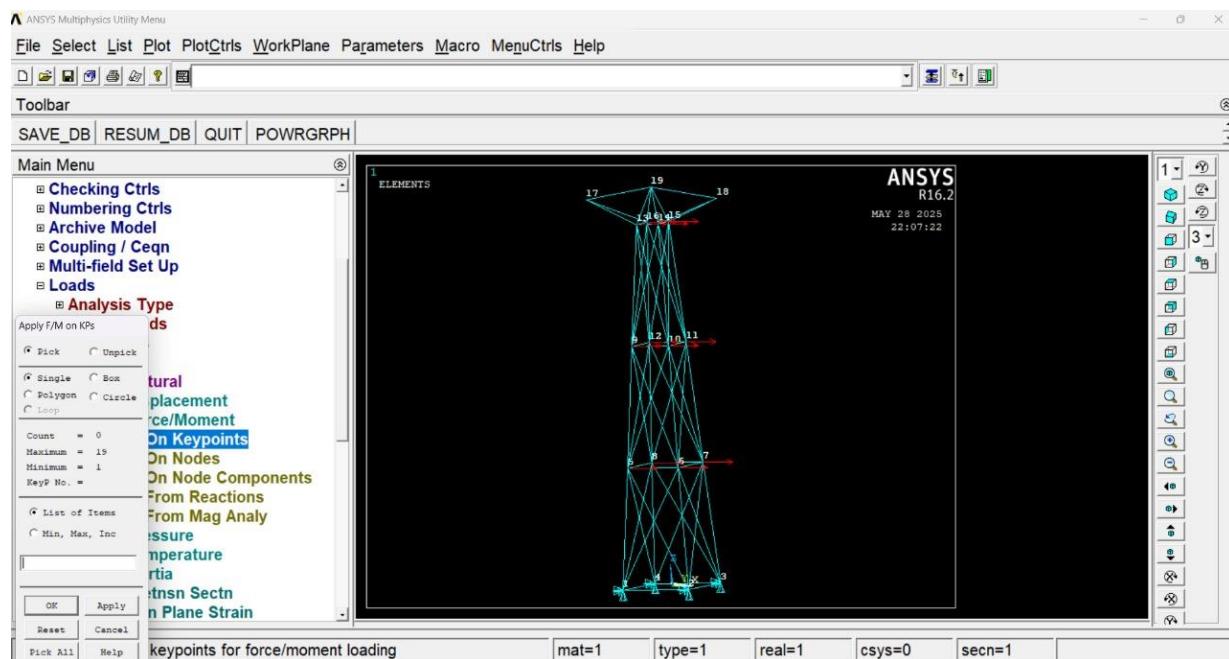


Ilustración 7. estructural

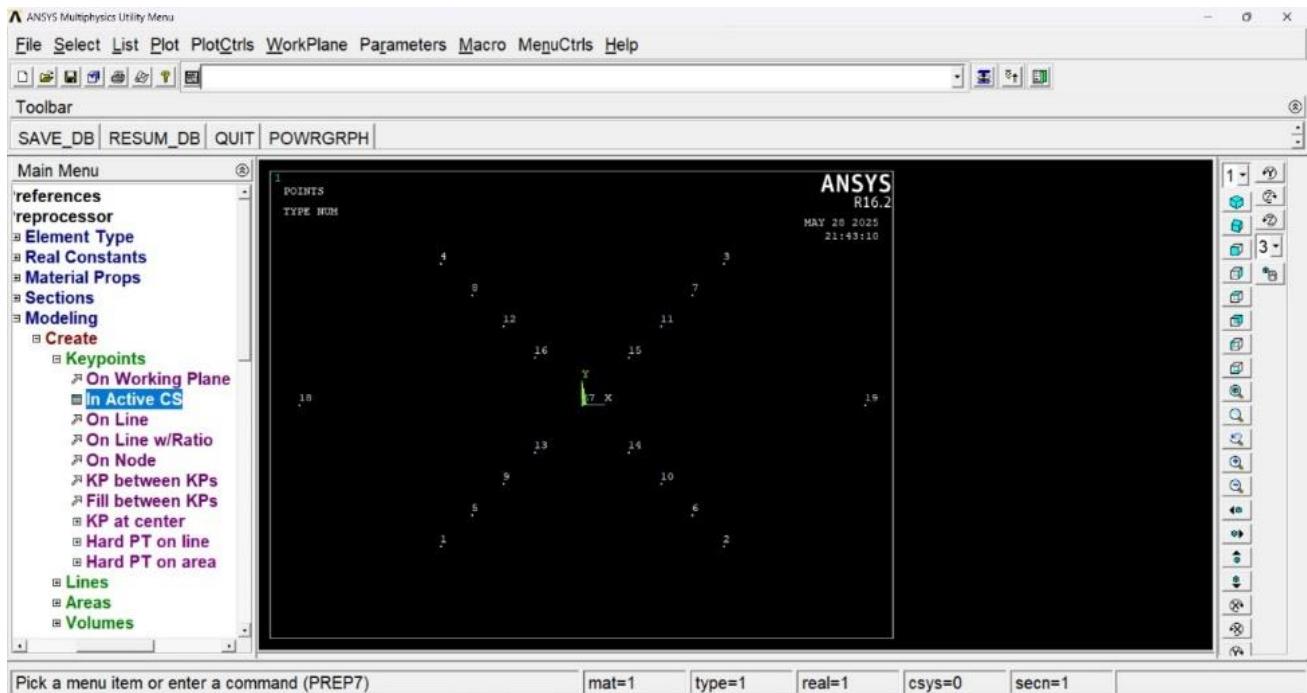


Ilustración 9 puntos para la creación del la figura

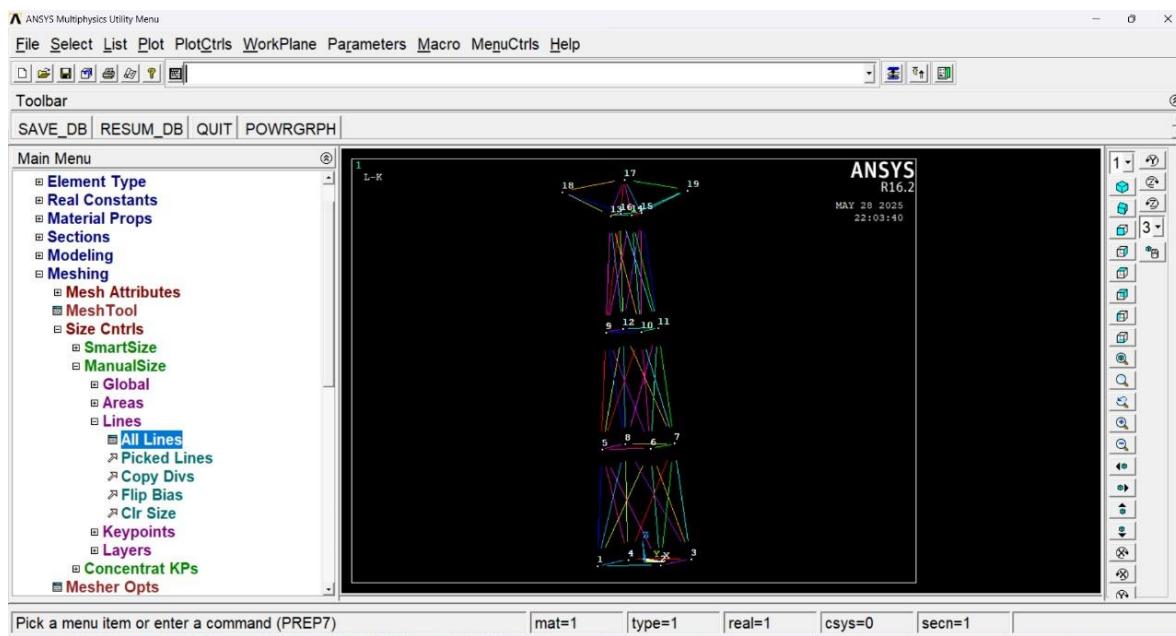


Ilustración 10 mallado

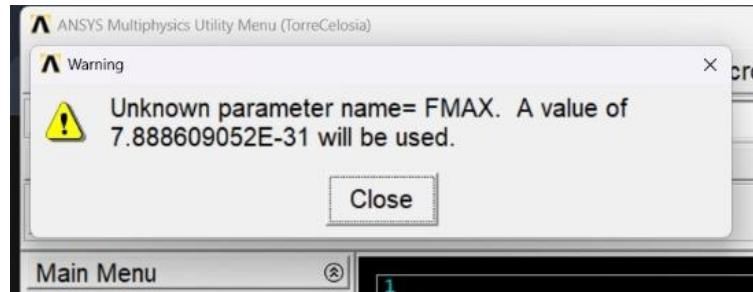


Ilustración 11

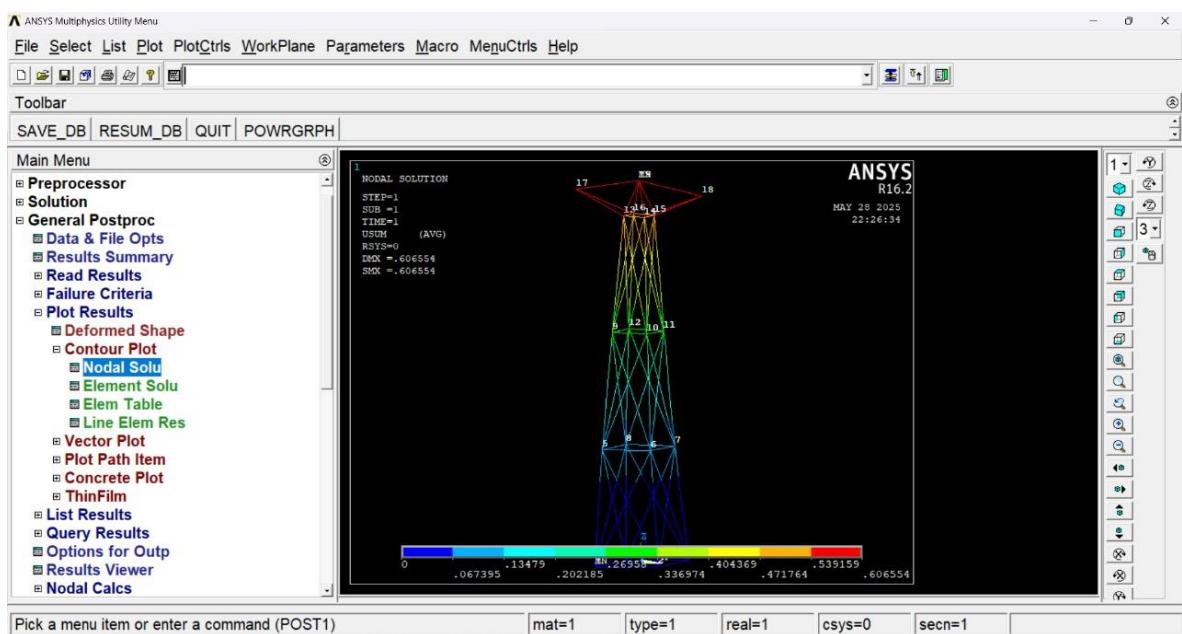


Ilustración 12 resultados de la deformacion aplicando cargas de viento en FX

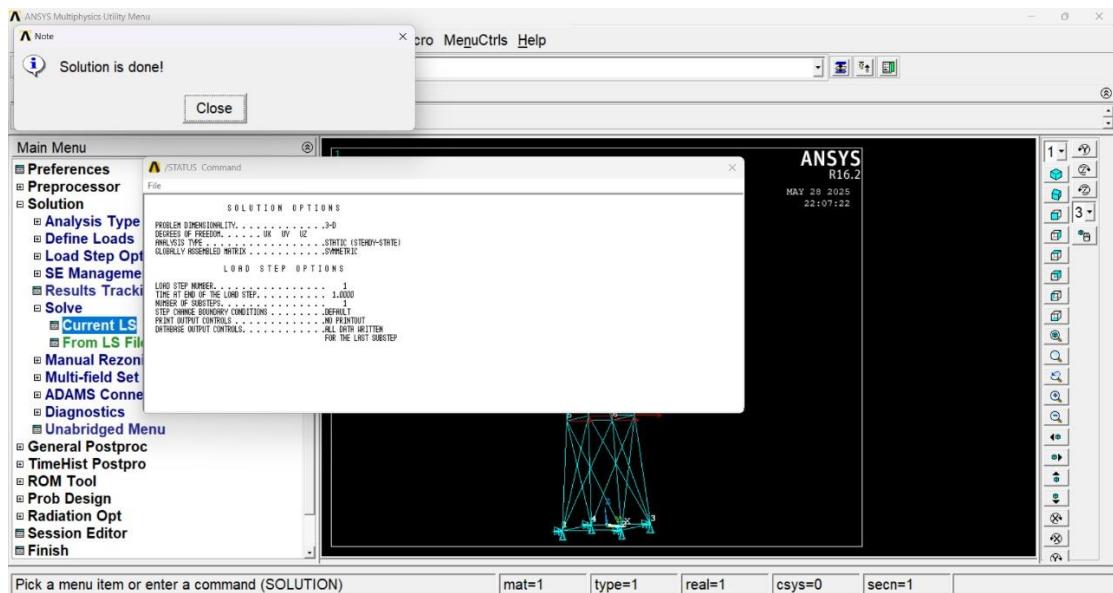


Ilustración 13

## CONCLUSION

A través del análisis estructural realizado mediante simulaciones en ANSYS, se logró evaluar el comportamiento de una torre de transmisión eléctrica sometida a condiciones extremas de viento. El modelo permitió identificar las zonas más vulnerables de la estructura, especialmente en las uniones entre miembros y en los elementos esbeltos sometidos a esfuerzos críticos.

Como referencia inicial, se consideró un ejemplo teórico basado en componentes fabricados con acero Q235, donde se estimó un esfuerzo máximo de 160 MPa frente a un límite elástico de 235 MPa. A partir de estos datos, se obtuvo un factor de seguridad de 1.47, valor cercano al mínimo aceptable según criterios de diseño estructural. Este resultado, aunque no corresponde directamente a nuestro modelo, fue utilizado como base comparativa para enmarcar la importancia del análisis estructural y entender el comportamiento de la torre bajo cargas severas. Dicha condición evidencia un margen de seguridad limitado ante eventos extremos, y por tanto, la necesidad de refuerzo en ciertas zonas críticas.

En contraste, el resultado real obtenido en nuestro trabajo arrojó un factor de seguridad de 7.88, lo que indica que la estructura diseñada puede resistir hasta casi ocho veces la carga aplicada en las simulaciones. Este valor representa un desempeño estructural sumamente robusto, reflejando un diseño altamente conservador y con un amplio margen de seguridad frente a condiciones extremas como ráfagas intensas de viento. Sin embargo, este nivel tan alto de seguridad también sugiere un posible sobredimensionamiento, lo que puede traducirse en un uso innecesario de material y mayores costos de construcción.

En una segunda simulación, se ajustaron las condiciones de contorno y se refinaron ciertos parámetros del modelo, incluyendo la geometría de los perfiles y las cargas distribuidas, con el fin de representar con mayor precisión un escenario realista. Como resultado, se obtuvo un factor de seguridad de 1.87, el cual, aunque significativamente menor que el valor previamente calculado de 7.88, sigue siendo adecuado según las normativas de diseño estructural. Este valor refleja un equilibrio más razonable entre seguridad y eficiencia estructural, ya que permite garantizar la

integridad de la torre ante eventos extremos sin incurrir en un sobredimensionamiento excesivo. Además, este resultado pone en evidencia la importancia de la optimización del diseño, permitiendo reducir costos sin comprometer la estabilidad del sistema.

En función de lo anterior, se concluye que, si bien la torre evaluada presenta un comportamiento excelente bajo cargas extremas, existe la posibilidad de optimizar el diseño. Reducir el factor de seguridad a un rango eficiente (entre 2.0 y 3.0) permitiría mantener la integridad estructural y, al mismo tiempo, hacer un uso más racional de los materiales, mejorando así la eficiencia técnica y económica del proyecto.

# Bibliografía

- [1] Y.-S. Z. L.-P. W. a. Z.-Q. D. Jia-Xiang Li, «Fragility Analysis of a Transmission Tower-Line System Subjected to Wind and Ice Loads Considering Fatigue Damage,» Crossref, 2024.
- [2] Q. Y. Chao Zhu a b, «Fragility analysis and wind directionality-based failure probability evaluation of transmission tower under strong winds,» 2024.
- [3] Estephania Jazvi Casas-Del Ángela, «Análisis estructural-modal de una torre de transmisión eléctrica usando Sistema Viento 2.0, PRODISIS y ANSYS,» 2024.
- [4] J. A. E. Valdez, «Efectos Dinámicos de viento en una torre de líneas de transmisión eléctrica mediante dinámica de fluidos computacional.,» 2023.
- [5] Y. L. B. S. N. Z. J. C. H. W. a. J. M. Xiao Tan, «Study on Wind Resistance Performance of Transmission Tower,» Domenico and Raffaele Zinno, 2025.
- [6] E. J. C.-D. Ángela, «“Análisis estructural-modal de una torre de transmisión eléctrica usando Sistema,» 2024.