

UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



Trabajo de Diploma

Título: Cálculo de viga de estructura para Molino de Viento tipo multipala.

Autor: Víctor Manuel Lajares Baez.

Tutor: Dr. C. Idalberto de la C. Mendoza Díaz.

Santa Clara

Curso: 2015-2016

Año 58 de la Revolución.



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de Información Científico-Técnica

Pensamiento

*Todos y cada uno de
Nosotros paga puntualmente su cuota de
Sacrificio consciente de recibir el premio
En la satisfacción del deber cumplido,
Conscientes de avanzar con todos hacia
El Hombre Nuevo que se vislumbra en
El horizonte.*

Che

Dedicatoria

Dedico este trabajo y el momento más importante de mi vida a todas aquellas personas que de alguna manera han formado parte de ella:

- *A mis padres y hermana que me han apoyado en los momentos más duros de mi vida.*
- *A mis compañeros del aula con los cuales compartí estos largos cinco años.*
- *A todas mis amistades que de una forma u otra siempre confiaron en mí.*
- *En fin a todo aquel que me brindó su apoyo para que yo pudiera estar hoy donde estoy.*

Agradecimientos

La gratitud es el legítimo pago al esfuerzo ajeno, es reconocer que todo lo que somos es la suma del sudor de los demás, es tener conciencia de que un hombre solo no vale nada y la dependencia humana además de obligada es hermosa, por lo que les agradezco infinitamente a todas las personas que me brindaron su ayuda incondicional durante el desarrollo de este trabajo.

- *A mis padres y hermana quienes con sus esfuerzos han logrado la culminación satisfactoria de este trabajo.*
- *A mis compañeros de estudio.*
- *A mi tutor Dr. C. Idalberto de la C. Mendoza Díaz.*

Resumen

En el presente trabajo se hace un estudio sobre un molino de viento multipala tradicional que se encuentra situado en una de las vaquerías de la UBPC Desembarco del Granma, para verificar por qué se fractura una de las vigas que sujeta el tubo del bajante por donde fluye el agua. Se hace una revisión bibliográfica con el objetivo de resumir y mostrar los diferentes tipos de molinos de viento que existen, así como las diferentes características que presentan cada uno de ellos. Se plantea el cálculo de la fuerza de inercia a través del análisis de cinemático para diferentes posiciones trazadas con el objetivo de calcular la máxima aceleración del mecanismo. Se hacen chequeos de resistencia con diferentes apoyos para verificar porque la viga se fractura, se hacen análisis químicos para conocer el tipo de material de la misma y se simula la viga en el software profesional Solidworks con el objetivo de ver su comportamiento con diferentes apoyos tomados como base de estudio.

Abstract

This work is about the windmills traditional multiblade that is located in one of the dairy farms of the UBPC “Desembarco del Granma”, to verify why fracture of the beams holding the tube downspout where flows is water. A literature review was done in order to summarize and display different types of windmills that exist and the different features present each of them. Calculating the inertia force through kinematic analysis of different lines for positions in order to calculate the maximum acceleration mechanism arises. Checks resistance are made with different props to verify that the beam is broken, chemical analyzes are made for the type of material thereof and the beam is simulated in the Solidworks professional software in order to view their behavior with different props taken as a basis for study.

Índice

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MOLINOS	5
1.2 TIPOS DE MOLINOS DE VIENTO	6
1.2.1 Turbinas de viento	6
1.2.2 Molinos de poste	7
1.2.3 Molino de drenaje simple	7
1.2.4 Molino de viento americano	7
1.2.5 Molino de torre	7
1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS MOLINOS DE VIENTO	8
1.3.1 Clasificación por posición del eje	8
1.3.2 Clasificación por número de palas de los rotores horizontales	8
1.3.3 Clasificación por potencia de los molinos	9
1.4 PARTES DEL MOLINO DE VIENTO	9
1.4.1 Descripción general del funcionamiento	10
1.5 COMPORTAMIENTO DE LOS MOLINOS DE VIENTO EN CUBA	10
1.6 COMPORTAMIENTO DE MOLINOS DE VIENTO EN LA UBPC DESEMBARCO DEL GRANMA	11
CAPÍTULO II	13
2.1 SISTEMA DE TRANSMISIÓN	14
2.2 CÁLCULO DE LA FUERZA DE INERCIA	15
2.2.1 Determinación de la velocidad angular del volante del mecanismo	15
2.2.2 Análisis cinemático del mecanismo	19
CAPÍTULO III	42
3.1 PROPIEDADES QUÍMICAS Y MECÁNICAS DE LA VIGA CUESTIONADA ...	43
3.2 CÁLCULO DE RESISTENCIA	44
3.2.1 Cálculo de resistencia de la viga teniendo en cuenta los dos apoyos como articulados fijos	45
3.2.2 Cálculo de resistencia de la viga teniendo en cuenta que esta empotrada en los dos extremos	46
3.2.3 Determinación de las tensiones aplicando software profesional solidworks	51
3.2.3 Cálculo de resistencia de la viga por impacto vertical	61
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	65

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
ANEXOS	68

Introducción

Las máquinas eólicas se han utilizado desde hace muchos siglos para el bombeo de agua, la trituration de granos, cortar madera, etc. El molino de viento ha sido concebido para aprovechar la energía del viento enfocado principalmente a la ausencia de otro tipo de energía en el lugar de instalación y/o en el cuidado del medio ambiente.

El molino de viento multipala tradicional es el más común de los molinos de viento, su desarrollo tuvo lugar entre 1850 y 1930 y es conocido comúnmente como el Molino de Viento Americano (ver anexo I). (American Farm Windpump) [5].

La situación problemática:

El presente trabajo se desarrolló en la UBPC Desembarco del Granma donde existen varios molinos del tipo multipala tradicional (molino de viento americano) con la función de bombear agua a diferentes tanques que hay en cada una de las vaquerías y cochiqueras. Dentro de los existentes hay uno que presenta problemas en su estructura (ver anexo II) la cual se rompe con frecuencia e impide que realice las funciones para las cuales se diseñó.

Objetivo general

Chequeo de la resistencia y la rigidez de la viga transversal que soporta el bajante principal, en la estructura del molino de viento.

Tareas fundamentales:

- 1- Revisión bibliográfica del tema.
- 2- Estudio de la estructura del molino y definición de dimensiones de la viga a analizar y cargas aplicadas.
- 3- Definición de la fuerza de Inercia.
- 4- Estudio y definición del tipo de material utilizado en la viga.
- 5- Estudio del comportamiento de las tensiones de la viga y su correspondiente chequeo.

Viabilidad:

Se considera viable el estudio a realizar debido a la existencia de todos los recursos materiales tales como: equipos para realizar las mediciones pertinentes, equipo de cómputo, software, así como la instalación que será objeto de estudio, también la existencia del personal calificado para su realización. Se considera no significativo el costo económico.

CAPÍTULO I

MOLINOS DE VIENTO

CAPÍTULO I: MOLINOS DE VIENTO.

La primera referencia de un molino de viento aparece en los escritos del historiador árabe Tabari del año 850 D.C., sobre la existencia de estas máquinas en la provincia de Seistán en Persia en el 644 D.C. Durante las cruzadas (1096 – 1191) la existencia de los molinos de viento se conoció en Europa, más tarde comenzó la expansión y los primeros se reportan en Holanda en 1240, Alemania en 1222, Grecia 1239, Dinamarca en 1259, Finlandia en 1463, Rusia en 1622. En América se reporta Brasil en 1576, USA en 1621 y Barbados en 1651. En África al final del siglo 17 en Sudáfrica [5].

La primera vez que se empleó una distribución radial de velas fue en 1838 en Inglaterra, lo cual constituye el concepto primario de los molinos de viento actuales [5].

El desarrollo de los molinos de viento cambió de Europa a Estados Unidos durante el siglo XIX, esto estuvo motivado por el movimiento de los colonos hacia las Grandes Llanuras durante los años 50, cuando el mayor problema era el aprovisionamiento de agua para las grandes dotaciones de ganado. Con el desarrollo del ferrocarril la necesidad de agua para alimentar las locomotoras impulsó el desarrollo de esta tecnología [5].

A finales de la década del 80 tuvo lugar la mayor producción de molinos de viento en Estados Unidos. El primer éxito comercial tuvo lugar con el “American Farm Windpump”, inventado en 1854 por un mecánico de New England llamado Daniel Halladay, que tenía un rotor en forma de flor muy parecido al que conocemos hoy día [5].

Los primeros molinos de viento fueron hechos en madera y el uso del hierro y el acero comenzó en los años 70, pero se necesitaron dos décadas para que un número sustancial de molinos de acero fuera producido. Ya en los primeros años del siglo XX la mayor parte de los molinos se fabricaban de acero, posteriormente le fueron introducidos los cojinetes en el eje principal, la autolubricación y el mecanismo recíprocante que fue encerrado en un recipiente de hierro fundido que contenía aceite [5].

La tecnología del molino americano se difundió en el mundo durante los años 1890 y se producían bajo licencia o con diseños similares en Australia, Argentina, África del Sur, Inglaterra, Francia, Italia, Alemania y Suecia [5].

Esta situación favorable se mantuvo hasta los años 1920, en los años 1930 la gran depresión económica, los motores de combustión interna y la electrificación después de 1945 golpearon fuertemente a la industria de los molinos de viento. Por los años 50 y 60 solo unos pocos fabricantes permanecían activos [5].

Sin embargo la crisis del petróleo en 1973 causó un interés renovado en las fuentes renovables de energía, en particular en la energía eólica y las inversiones en la fabricación de molinos de viento se tornaron de nuevo atractivas. A partir de este momento en que tuvo lugar el renacimiento de las aerobombas, un gran número de interesantes innovaciones han aparecido [5].

1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MOLINOS:

Los molinos de viento tienen diferentes clasificaciones, estas clasificaciones dependen del tipo de energía motora que utilizan.

-Molinos de Viento: Son los más comunes y constan de una estructura como base, de una altura considerable, que contiene en el extremo superior una serie de aspas o palas similares a las de un ventilador. Estas son accionadas a través de la fuerza del viento, lo que las hace girar y a través de su mecanismo generan la fuerza para los artefactos de molienda ubicados en el interior de la estructura [1].

Tales métodos de molienda pueden variar de un molino a otro. Existen algunos que, a través de la fuerza eólica, utilizan motores, generando energía eléctrica y con esto el funcionar de la molienda. Otros consisten en complejos mecanismos de rulemanes y engranajes que solo utilizan la fuerza mecánica. Estos mecanismos varían según cuál sea el objetivo y la función del molino, ya que los de viento son utilizados no solo para la molienda sino que también pueden ser utilizados para extraer agua del suelo o para generar energía eléctrica [1].

-Molinos Hidráulicos: La utilización de estos estaba destinada generalmente a la molienda de trigo para la elaboración de harina. Su mecanismo consistía en unas ruedas con aspas contenedoras que eran accionadas por el flujo de la corriente de algún canal o río. Esto accionaba a una rueda principal con eje horizontal y a través de engranajes y embragues se transmitía la fuerza a otra rueda de eje vertical conectada a las piedras de moler [1].

También existen diversos mecanismos, algunos poseen una sola rueda en eje vertical y se ubican en zonas del canal comprimidas lo que permite mayor presión del agua y bien direccionada, moviendo a gran velocidad la rueda. Otras también sobre eje horizontal pero se ubican bajo caídas de grandes cantidades de agua, donde la fuerza se genera por el peso del agua y no por la velocidad con la que corre [1].

-Molinos de Sangre: El accionar de estos mecanismos tiene como objetivo la molienda. Como energía motora utiliza la fuerza de animales como bueyes o mulas, que van girando en torno a los cuencos moledores accionando unas palas conectadas al eje del mismo. Es mayormente utilizado en zonas que escasea el viento o la fuerza hidráulica [1].

-Aerogeneradores: Son conocidos como molinos aunque en realidad su función no es la moler sino la de generar energía eléctrica a partir de la energía eólica. Son el tipo de molinos más modernos y su mecanismo es bastante simple. Consta de hélices o aspas que accionan con la energía del viento y poseen una veleta que los direcciona de manera tal que siempre quede en la dirección necesaria, sin importar los cambios de corrientes de aire. Son de tamaño reducido y se pueden encontrar parques eólicos enteros con miles de molinos de este tipo generando energía sustentable [1].

1.2 TIPOS DE MOLINOS DE VIENTO:

Los tipos de molinos de viento pueden ser divididos en cinco categorías en dependencia de su diseño y construcción.

Los principales tipos son: Turbinas de viento, molinos de postes, molino de drenaje simple, molino de viento estadounidense, molino de torre.

1.2.1 TURBINAS DE VIENTO:

El molino de viento de la turbina eólica (ver anexo III) se caracteriza por su diseño gigante de tres rotores. Este tipo de molino de viento se utiliza para generar energía mecánica y electricidad, mediante la conversión de la energía cinética (energía de movimiento) en energía mecánica. La energía mecánica se conecta a un generador, la cual es convertida en electricidad. En términos simples, se podría decir que las turbinas eólicas utilizan el viento para producir electricidad y la electricidad de la turbina de viento viaja a través de las líneas de distribución para suministrar electricidad a escuelas, empresas y hogares [2].

1.2.2 MOLINOS DE POSTE:

El primero de estos molinos de viento europeos no tenía freno y se construyeron hasta la mitad del siglo XIX. El molino de poste se utiliza para el molino de piedra, pero son de tamaño pequeño, lo que limita su capacidad de molienda. Hay dos tipos de molinos de poste. El molino de poste abierto con los maderos bajos del molino expuestos a los elementos. Y los molinos de poste cerrados con los maderos bajos del molino encerrados y pueden ser usados para el almacenaje [2].

1.2.3 MOLINO DE DRENAJE SIMPLE:

El molino de drenaje simple (ver anexo V) se utiliza para bombear agua en los canales de riego. Exclusivamente encontrado en la provincia de Frisia en los Países Bajos, este pequeño molino está diseñado con velas fijadas a un tornillo de Arquímedes en el interior de un tubo hueco. Los molinos de drenaje simple están por lo general en lugares donde la tierra es extremadamente pantanosa [2].

1.2.4 MOLINO DE VIENTO AMERICANO:

El primer molino de viento americano fue inventado por Daniel Halladay en 1854 en Connecticut. Halladay patentó un molino de viento que no requiere la atención constante de un operador. Su molino de viento era de madera y requería de mucho mantenimiento. Pero a medida que pasó el tiempo, los molinos de viento de metal se introdujeron encontrando que eran más confiables. También se encontraron más confiables las cajas de cambios auto lubricadas y las ruedas pivotadas de viento, utilizadas por los molinos de viento. Estos molinos más eficientes y libres de mantenimiento fueron utilizados por las compañías de ferrocarriles y por los colonos [2].

1.2.5 MOLINO DE TORRE:

El molino de torre (ver anexo VI) es un molino de viento construido en Europa a lo largo de la orilla del mar, de cara al mar y se utiliza para generar energía. Las velas de los molinos de torre son como las velas de un barco. Las velas tienen varios mástiles, estructura sobre la parte superior del barco para sostener las velas, están fijados a un eje rotatorio y se construyeron primero tanto en la orilla como en alta mar cerca de Creta, Italia y Grecia. Hay diferentes estilos de molinos de torre. Las velas Grondzeilers giran y se puede acceder

desde el suelo. Beltmolen está construido en la cima de una colina o dique. Binnenkruier es un molino simulado con una tapa girada por un abanico de la cola. La tapa de Buitendkruier es girada por el poste de la cola [2].

1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS MOLINOS DE VIENTO:

1.3.1 CLASIFICACIÓN POR POSICIÓN DEL EJE:

-Eje vertical. Existen modelos como el de Savenius que está formado por dos semicilindros huecos decalados. Tiene un gran par de arranque por lo que suele usarse para bombeo de agua. Otro modelo más avanzado es el modelo Darrerius, más competitivo actualmente, consiste en aspas verticales con perfil aerodinámico. Requiere un arrostramiento, lo que limita su altura y con ello su potencia nominal. Aun así se siguen fabricando y explorando como candidatos para un futuro [3].

-Eje horizontal. Son los más comunes y que se implantan en la mayoría de los casos. En el punto siguiente se desarrolla los diferentes tipos que existen en función del número de palas, que suele ser el elemento diferenciador [3].

1.3.2 CLASIFICACIÓN POR NÚMERO DE PALAS DE LOS ROTORES HORIZONTALES:

-Multipala: es el tipo de molino que se desarrolló en un primer momento en el mundo. Con el intento de incrementar la potencia, que va ligado con la altura del molino, surge la necesidad de hacerlos más ligeros. Esto junto con el hecho de que al aumentar la relación de velocidades de la punta de la pala frente al viento menor es la influencia del número de palas sobre el rendimiento, hace que se pase a fabricar hélices con dos, tres e incluso una sola pala para reducir sensiblemente el peso y el coste [3].

-Tripala: son los más utilizados actualmente, presentan mayor suavidad en el giro [3].

-Bipala: tienen un giro menos estable pero al aumentar el tamaño del rotor se usan más por la reducción de peso y coste que supone [3].

-Monopala: está formada por una única pala con un contrapeso en el otro extremo que compense el giro. Así éste se realiza de una forma lo más suave posible [3].

1.3.3 CLASIFICACIÓN POR POTENCIA DE LOS MOLINOS:

-**Aerogeneradores de muy pequeño tamaño:** son generadores que sirven para cargar baterías, de menos de 20 kW. Sirven para proporcionar energía eléctrica a asentamientos aislados. También sirven para alimentar balizas luminosas o radioeléctricas u otras instalaciones remotas [3].

-**Aerogeneradores de pequeño tamaño** (20 kW a 100 kW) [3].

-**Aerogeneradores de medio tamaño** (100 kW a 1 MW) [3].

-**Aerogeneradores de gran tamaño** (>1 MW) [3].

1.4 PARTES DEL MOLINO DE VIENTO:

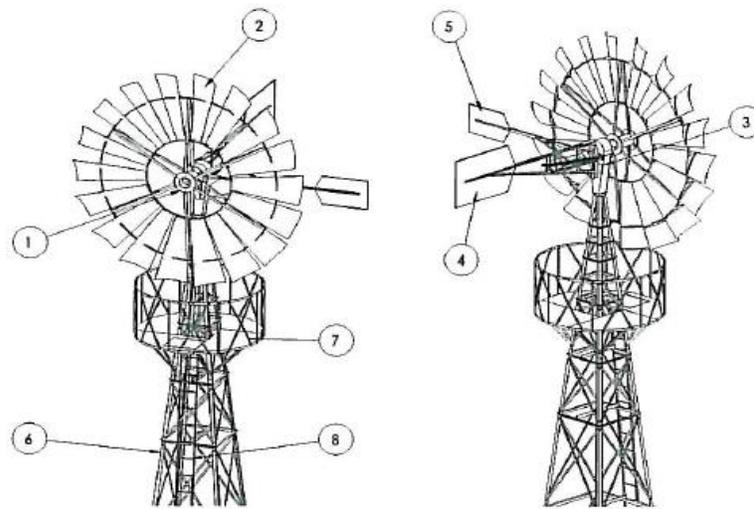


Figura 1.6. Partes de un molino de viento

En la figura 1.6 se representa un croquis de molino de viento tipo multipala. Entre sus principales partes están:

1-Eje de la rueda: guía el movimiento de rotación de la rueda en movimiento alternativo vertical por medio de vástago [4].

2-Rueda: transforma la energía eólica en energía mecánica [4].

3-Cabezal: alberga la excéntrica y la biela del molino de viento [4].

4-Cola orientadora: orienta la rueda en dirección del viento [4].

5-Cola desorientadora: desorienta progresivamente la rueda en caso de vientos excesivos o cuando se quiera parar el molino de viento [4].

6-Torre: permite colocar la rueda a la altura óptima para alcanzar vientos más constantes y de mayor velocidad [4].

7-Plataforma superior: facilita las tareas de mantenimiento [4].

8-Escalera de acceso: permite un acceso fácil y cómodo a la parte superior [4].

1.4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL FUNCIONAMIENTO:

El molino de viento empieza a bombear agua a una velocidad del viento de 4 m/s. La rotación de la rueda acciona, a través de la biela y por medio de los vástagos instalados en el interior de los tubos galvanizados, la bomba de pistón (instalada en el interior del pozo). La bomba dispone de un pistón y un sistema de válvulas que, de forma coordinada con el movimiento transmitido por los vástagos, van impulsando el agua por el interior de los tubos hasta la superficie para desembocar en un depósito [4].

Una de las características principales de la bomba de pistón es que en caso de que el pozo quedara con un caudal inferior al previsto para la bomba, esta seguiría bombeando agua y aire sin resultar perjudicada. El molino de viento traslada el agua y, si es necesario, también la eleva por encima de la altura de la torre, simplemente colocando un prensa-estopas que impide el rebosamiento del agua [4].

1.5 COMPORTAMIENTO DE LOS MOLINOS DE VIENTO EN CUBA:

En Cuba el uso de los molinos de vientos para el bombeo de agua es decir, las aerobombas, se remonta a las primeras décadas del siglo XX. A finales del año 1996 se reportaban por el Ministerio de la Agricultura alrededor de 5000 molinos de viento instalados por todo el país, en dependencia de dicho ministerio, que sumado a los demás alcanzaban un total aproximado de 7000. En los años 80 se registraban alrededor de 8000 aerobombas, esta diferencia entre estos años fue causada por la situación económica surgida a principio de esta década cuando la producción y mantenimiento de estas máquinas se vio fuertemente deprimida. A principio de los años noventa se comenzó a fabricar en Camagüey, una

aerobomba ligera y de menor costo. En este período se fabricaban molinos de viento en varias empresas pertenecientes al Ministerio de la Agricultura (MINAGRI) y al Ministerio de la Industria Sidero – Mecánica y la Electrónica (SIME), los que dejaron de fabricarse por los motivos económicos anteriormente citados [5].

Actualmente se realizan serios esfuerzos por recuperar la producción de aerobombas en algunas de estas fábricas como la “26 de Julio” del MINAGRI en Granma, donde ya se comercializan establemente estos equipos [5].

La introducción de esta tecnología desde el punto de vista de la producción, operación y mantenimiento, necesita que los productores, instaladores, usuarios y la población en general posean los conocimientos necesarios para un correcto diseño, selección, instalación y operación de estos equipos [5].

1.6 COMPORTAMIENTO DE MOLINOS DE VIENTO EN LA UBPC DESEMBARCO DEL GRANMA:

Las características generales de los molinos existentes en la UBPC son:

Cantidad de molinos: 12

Tipos: Multipala (estadounidense).

Numero de palas: Oscilan entre 18 - 22 palas.

Diámetro: Oscilan entre los 2 – 2,45 m.

Materiales de las torres: (Se desconoce).

Elementos principales de la torre: angulares de alas iguales L 51 X 51 X 3,2 mm.

Altura de las torres: Oscilan entre 12 – 18 m.

Altura promedio de bombeo: Oscilan entre 15 – 25 m.

Velocidad del viento: Oscila entre 3 – 4 m/s.

Dentro de los existentes hay uno que presenta problemas en su estructura la cual se rompe con frecuencia e impide que realice las funciones para las cuales se diseñó. El material de la

torre de este molino se desconoce, esta torre mide 12 m de altura, la altura de bombeo es de 25 m, teniendo en cuenta la profundidad del manto freático, la altura del agua en el tanque de almacenamiento y las pérdidas hidráulicas en las tuberías. Este tipo de máquina aprovecha la potencia del viento con un rotor compuesto por 18 palas, el diámetro del mismo es de 2 m, la velocidad del viento es de 4 m/s.

Después de una valoración y comparación entre el funcionamiento de los molinos existentes en dicha cooperativa y sus montajes, se pudo constatar que dicho molino no está instalado sobre el pozo, si no a un costado (ver anexo VII). Lo anterior ha conllevado a que el tubo que desciende desde el rotor no este apoyado en la parte inferior del molino sino que se encuentra sostenido por varias vigas transversales, siendo la última (de mayor longitud) la que sufre la fractura.

CONCLUSIONES PARCIALES:

- 1- El molino de viento ha sido concebido para el bombeo de agua, la trituración de granos, cortar madera, etc., con la intención de aprovechar la energía del viento enfocado principalmente en lugares de difícil acceso de la corriente eléctrica y en el cuidado del medio ambiente.
- 2- Los principales molinos de vientos son: turbinas de viento, molinos de poste, molino de drenaje simple, molino de viento estadounidense y molino de torre. El que presenta problema en la UBPC Desembarco del Granma es del tipo estadounidense y sus características principales son:
 - material: (Se desconoce).
 - altura de la torre: 12 m
 - altura de bombeo: 25 m,
 - número de palas del rotor: 18
 - diámetro del rotor: 2 m,
- 3- La principal causa de fractura de la estructura de uno de los molinos de viento que existe en la UBPC es que el tubo que desciende desde el rotor no este apoyado en la parte inferior del molino sino que se encuentra sostenido por varias vigas transversales, siendo la última (de mayor longitud) la que sufre la fractura.

CAPÍTULO II

CÁLCULO DE LA FUERZA DE INERCIA

CAPÍTULO II: CÁLCULO DE LA FUERZA DE INERCIA.

Para poder estudiar el comportamiento de las tensiones y las deformaciones en la Viga que falla, perteneciente a la estructura metálica que sostiene el molino, se hace necesario conocer las fuerzas que actúan sobre dicha viga. En este caso la fuerza total estará compuesta por el propio peso del sistema de la tubería y el efecto de la fuerza de inercia del émbolo durante el funcionamiento

La Fuerza de Inercia es el resultado de la acción de la masa de un cuerpo por su aceleración. Este capítulo se basa en el cálculo de dicha fuerza para comprender y analizar la importancia que tiene dicho valor sobre la biga cuestionada.

2.1 SISTEMA DE TRANSMISIÓN:

Un sistema de bombeo eólico se compone además del rotor de otros elementos que es necesario diseñar o seleccionar. La transmisión de una aerobomba es el elemento que convierte el movimiento de rotación del rotor en un movimiento adecuado a la bomba que se instala. El tipo de transmisión depende del tipo de bomba y del diseño del fabricante. Para una bomba recíprocante o de pistón, comúnmente empleada en los molinos tradicionales, la rotación horizontal del rotor se debe convertir en un movimiento alternativo vertical [5].

Para este tipo de bomba la velocidad de rotación del rotor por lo general es mayor que la recomendable para el pistón (menor de 40 ciclos por minuto), por lo que es necesario una caja reductora. La caja reductora tiene la ventaja que al reducir la velocidad aumenta el torque de trabajo, disminuyendo la velocidad de arranque. El sistema de transmisión empleado más comúnmente es el de biela y manivela que adaptado para la aerobombas se ilustra en la figura 2.1 [5]:

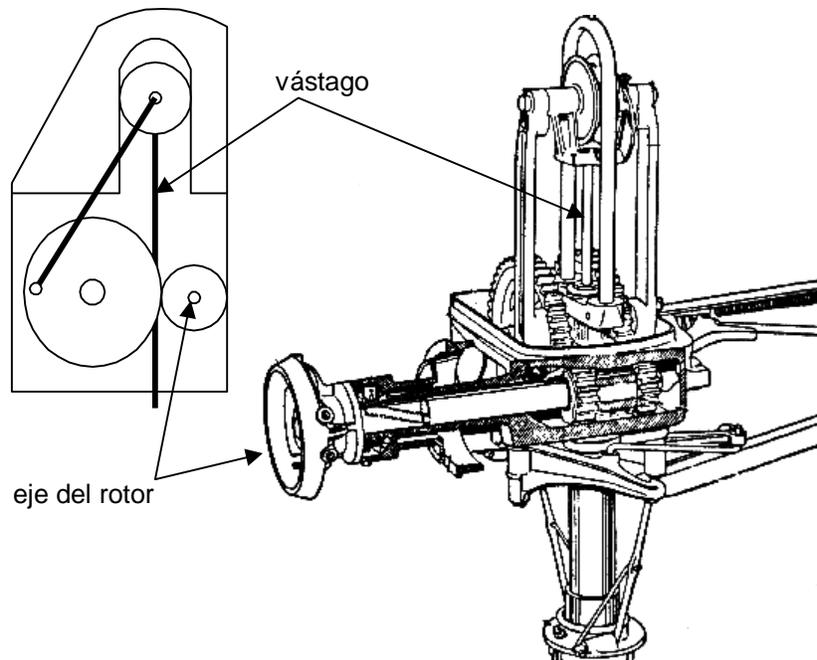


Fig. 2.1: Sistema de transmisión de Biela y manivela usado en molinos viento

El sistema de transmisión mostrado en la figura 2.1 es que se introdujo desde los primeros momentos en este tipo de máquina [5].

Una de las desventajas de este tipo de transmisión es que el torque de arranque es 3 veces mayor que el torque de trabajo, por lo que en estos momentos se trabaja en el diseño de nuevas transmisiones [5].

La relación de transmisión, i , más común en los molinos tradicionales es de 3.29. Existen otros valores como son 3.34, 3.50 y 4 [5].

Estos valores dependen del tipo de fabricante por lo que pueden encontrarse valores diferentes a estos en los catálogos y la literatura especializada [5].

2.2 CÁLCULO DE LA FUERZA DE INERCIA:

2.2.1 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD ANGULAR DEL VOLANTE DEL MECANISMO:

Para la determinación del número de ciclos por minutos, n , de la catalina, es necesario conocer dos parámetros:

-La velocidad de rotación del rotor, n_r . [5].

-La relación de transmisión de la caja reductora, i [5].

La velocidad de rotación del rotor depende del diseño aerodinámico de éste, es decir del tipo de rotor y del número de palas. Como es lógico pensar una máquina eólica con pocas palas (2-3 palas) debe girar a más alta velocidad que una máquina con 18, si ambas tienen el mismo diámetro. La velocidad tangencial de la punta de la pala es U , definida por [5] :

$$U = \pi * d * \frac{n}{60} \quad (2.1)$$

Dónde:

n : Número de ciclos por minuto.

d : Diámetro del rotor.

Tomando como base esta velocidad y la velocidad del viento, v , se define un factor adimensional, conocido como velocidad específica de la punta λ_o [5] :

$$\lambda_o = \frac{U}{v} \quad (2.2)$$

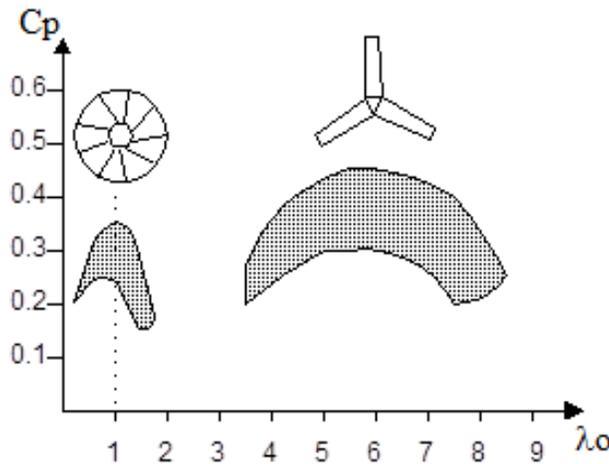


Fig. 2.2: Dependencia de C_p vs λ_o para diferentes números de aspas

En la figura 2.2 se muestra la dependencia C_p vs λ_o para dos tipos de rotores, el multipala y un rotor de 3 palas solamente. De esta figura se pueden sacar las siguientes conclusiones:

-Para cada tipo de rotor existe un valor de C_p máximo, con su correspondiente valor de λ_o , a este valor de λ_o se le llama velocidad específica de diseño, λ_d [5].

-El máximo valor alcanzable C_p hasta este momento es de alrededor de 0.45 en los rotores de 3 palas. Normalmente un valor de C_p entre 0.3 y 0.35 puede ser fácilmente alcanzable en los rotores de molinos multipala tradicionales, para un valor de $\lambda_d = 1$ [5].

Conocida la velocidad específica de diseño λ_o , de las ecuaciones (2.1) y (2.2) se despeja n_r [5]:

$$n_r = \frac{60 * v_d * \lambda_d}{\pi * D} \text{ [rpm]} \quad (2.3)$$

Donde v_d – velocidad de diseño [5].

La velocidad de diseño se define como la velocidad para la cual se alcanza el C_p máximo. Los valores recomendables de la velocidad de diseño se encuentran entre [5].

$$v_d = (1.5 - 2.0) * \bar{v} \quad (2.4)$$

Siendo \bar{v} la velocidad media del mes de diseño (4 m/s) [5].

Conociendo la velocidad media del mes de diseño, a través de las ecuaciones (2.3) y (2.4) se determina v_d y n_r respectivamente [5].

Aquí se toma el valor de 1.5 ya que es el coeficiente que se multiplica con el valor de velocidad que interactúa directamente con las aspas del molino, no siendo así con el valor de 2.0 porque este es el coeficiente que se toma después que el viento pasa por las aspas del molino [5].

$$v_d = 1.5 * 4$$

$$v_d = 6 \text{ m/s}$$

$$n_r = \frac{60 * v_d * \lambda_d}{\pi * D}$$

$$n_r = \frac{60 * 6 * 1}{\pi * 2}$$

$$n_r = 57,3 \text{ r.p.m}$$

Los ciclos por minuto, n , de la catalina se calcula mediante el valor de la relación de transmisión, i [5]:

$$i = \frac{n_r}{n} \quad (2.5)$$

Es decir:

$$n = \frac{n_r}{i} \quad (2.6)$$

Como se vio anteriormente, cuando se trató el tema de las transmisiones, el valor más común de i en molino multipala es 3.29 [5]:

$$n = \frac{57,3}{3,29}$$

$$n = 17,42 \text{ r.p.m}$$

Para llevar estos valores a rad/seg. se multiplican por la expresión:

$$w_1 = \frac{2 * \pi * n_r}{60} \quad (2.7)$$

$$w_1 = \frac{2 * \pi * 57,3}{60}$$

$$w_1 = 6 \text{ rad/seg}$$

$$w_2 = \frac{2 * \pi * n}{60}$$

$$w_2 = \frac{2 * \pi * 17,42}{60}$$

$$w_2 = 1,82 \text{ rad/seg}$$

2.2.2 ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL MECANISMO:

En este epígrafe se trata como objetivo fundamental el cálculo de la aceleración del pistón, para cada una de las posiciones trazadas.

El acoplamiento entre el rotor y la barra se realiza mediante un mecanismo de biela y manivela con reducción a través de engranes. La utilización de la caja reductora hace más versátil a la máquina y adecuada para trabajar con agua a grandes profundidades. Por otro lado la baja velocidad de trabajo hace la máquina más fiable por el menor desgaste por fricción de los elementos de la bomba y disminuye las roturas por fatigas. Los engranajes giran en un baño de aceite lubricante que debe ser chequeado periódicamente.

Posición 1

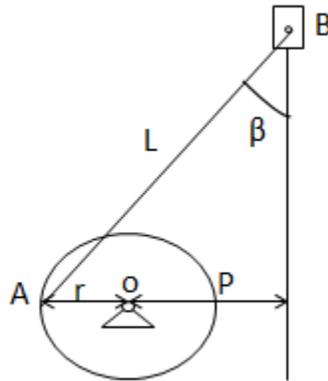


Fig. 2.3: Esquema cinemático del mecanismo para la posición dada.

Datos:

$$r = 0,12 \text{ m}$$

$$P = 0.16 \text{ m}$$

$$L = 0,32 \text{ m}$$

$$W_{oa} = 1,82 \text{ rad/seg.}$$

I) Análisis geométrico.

$$\beta = \sin^{-1} \frac{P+r}{L} \quad (2.8)$$

$$\beta = \sin^{-1} \frac{0,16+0,12}{0,32}$$

$$\beta = \sin^{-1} 0,875$$

$$\beta = 61,04^\circ$$

II) Análisis de velocidad.

$$\begin{array}{ccc} \rightarrow & \rightarrow & \rightarrow \\ v_B = v_A + v_{B/A} & & (2.9) \\ | & \downarrow & \swarrow 61,04^\circ \end{array}$$

• $v_B \rightarrow$ Magnitud desconocida.

$$\bullet v_A = \omega_{oa} * r_{oa} \quad (2.10)$$

$$v_A = 1,82 * 0,12$$

$$v_A = 0,21 \text{ m/s}$$

$$\bullet v_{B/A} = \omega_{ab} * L \rightarrow \text{Magnitud desconocida.} \quad (2.11)$$

- Construcción del polígono de velocidad.

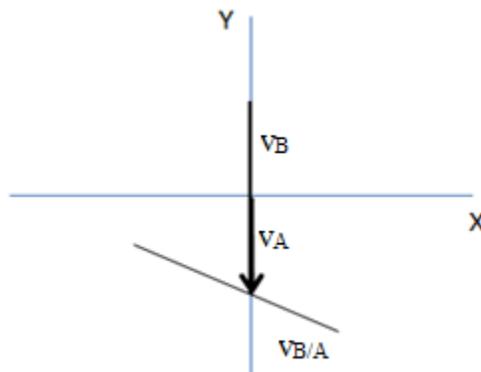


Fig. 2.4: Representación gráfica del comportamiento de las velocidades.

$$v_{B/A} = 0$$

$$v_B = v_A$$

$$v_B = 0,21 \text{ m/s}$$

III) Análisis de aceleración.

$$\begin{array}{ccc} \rightarrow & \rightarrow & \rightarrow \\ a_B = a_A + a_{B/A} & & (2.12) \end{array}$$

$$\vec{a}_B = \vec{a}_A^n + \vec{a}_A^t + \vec{a}_{B/A}^n + \vec{a}_{B/A}^t \quad (2.13)$$

• $a_B \rightarrow$ Magnitud desconocida.

$$\bullet a_A^n = (\omega_{oa})^2 * r_{oa} \quad (2.14)$$

$$a_A^n = (1,82)^2 * 0,12$$

$$a_A^n = 0,397 \text{ m/s}^2$$

$$\bullet a_A^t = 0$$

$$\bullet a_{B/A}^n = (\omega_{ab})^2 * L \quad (2.15)$$

$$a_{B/A}^n = (0)^2 * 0,32$$

$$a_{B/A}^n = 0$$

$$\bullet v_{B/A} = \omega_{ab} * L$$

$$\omega_{ab} = v_{B/A} / L$$

$$\omega_{ab} = 0/32$$

$$\omega_{ab} = 0$$

$$\bullet a_{B/A}^t = \alpha_{ab} * L \rightarrow \text{Magnitud desconocida.} \quad (2.16)$$

- Construcción del polígono de aceleración.

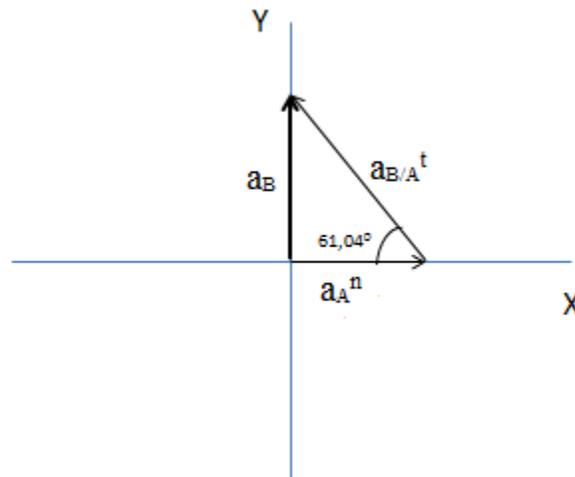


Fig. 2.5: Representación gráfica del comportamiento de las aceleraciones.

$$\text{I) } a_B = a_{B/A}^t * \sin(61,04^\circ) \quad + \quad \uparrow \quad (2.17)$$

$$\text{II) } 0 = a_A^n - a_{B/A}^t * \cos(61,04^\circ) \quad + \quad \rightarrow \quad (2.18)$$

$$0 = 0,397 - a_{B/A}^t * \cos(61,04^\circ)$$

$$a_{B/A}^t * 0,48 = 0,397$$

$$a_{B/A}^t = 0,397 / 0,48$$

$$a_{B/A}^t = 0,827 \text{ m/s}^2$$

Sustituyendo $a_{B/A}^t = 0,827 \text{ m/s}^2$ en la ecuación (2.17), tenemos:

$$a_B = 0,827 * \sin(61,04^\circ)$$

$$a_B = 0,7 \text{ m/s}^2$$

Resultados finales:

$$v_B = 0,21 \text{ m/s}$$

$$v_A = 0,21 \text{ m/s}$$

$$v_{B/A} = 0$$

$$a_B = 0,72 \text{ m/s}^2$$

$$a_A^n = 0,397 \text{ m/s}^2$$

$$a_A^t = 0$$

$$a_{B/A}^n = 0$$

$$a_{B/A}^t = 0,827 \text{ m/s}^2$$

Posición 2:

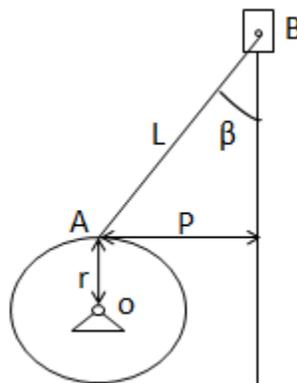


Fig. 2.6: Esquema cinemático del mecanismo para la posición dada.

Datos:

$$r = 0,12 \text{ m}$$

$$P = 0,16 \text{ m}$$

$$L = 0,3$$

$$w_{oa} = 1,82 \text{ rad/seg}$$

I) Análisis geométrico.

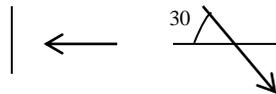
$$\beta = \sin^{-1} \frac{P}{L} \quad (2.19)$$

$$\beta = \sin^{-1} \frac{0,16}{0,32}$$

$$\beta = 30^0$$

II) Análisis de velocidad.

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{v}_{B/A} \quad (2.20)$$



• v_B → Magnitud desconocida.

$$\bullet v_A = w_{oa} * r_{oa} \quad (2.21)$$

$$v_A = 1,82 * 0,12$$

$$v_A = 0,21 \text{ m/s}$$

$$\bullet v_{B/A} = w_{ab} * L \rightarrow \text{Magnitud desconocida.} \quad (2.22)$$

- Construcción del polígono de velocidad.

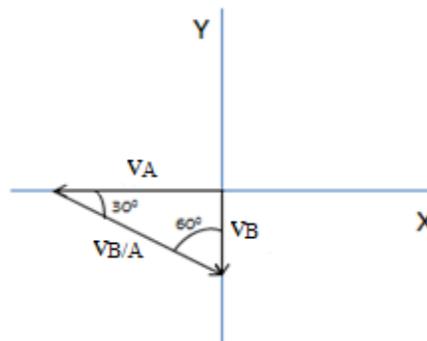


Fig. 2.7: Representación gráfica del comportamiento de las velocidades.

$$\frac{V_B}{\sin 30^0} = \frac{V_{B/A}}{\sin 90^0} = \frac{V_A}{\sin 60^0} \quad (2.23)$$

$$\bullet v_B = \frac{\sin 30^\circ * V_A}{\sin 60^\circ} \quad (2.24)$$

$$v_B = \frac{0,5 * 0,21}{0,87}$$

$$v_B = 0,12 \text{ m/s}$$

$$\bullet v_{B/A} = \frac{\sin 90^\circ * V_A}{\sin 60^\circ} \quad (2.25)$$

$$v_{B/A} = \frac{1 * 0,21}{0,87}$$

$$v_{B/A} = 0,25 \text{ m/s}$$

III) Análisis de aceleración.

$$\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}_{B/A} \quad (2.26)$$

$$\vec{a}_B = \vec{a}_A^n + \vec{a}_A^t + \vec{a}_{B/A}^n + \vec{a}_{B/A}^t \quad (2.27)$$

$\bullet a_B \rightarrow$ Magnitud desconocida.

$$\bullet a_A^n = (w_{oa})^2 * r_{oa} \quad (2.28)$$

$$a_A^n = (1,82)^2 * 0,12$$

$$a_A^n = 0,397 \text{ m/s}^2$$

$$\bullet a_A^t = 0$$

$$\bullet a_{B/A}^n = (w_{ab})^2 * L \quad (2.29)$$

$$a_{B/A}^n = (0,78)^2 * 0,32$$

$$a_{B/A}^n = 0,19 \text{ m/s}^2$$

$$\bullet a_{B/A}^t = \alpha_{ab} * L \rightarrow \text{Magnitud desconocida.} \quad (2.30)$$

$$\bullet v_{B/A} = w_{ab} * L$$

$$w_{ab} = v_{B/A} / L$$

$$w_{ab} = \frac{0,25}{0,32}$$

$$w_{ab} = 0,78 \text{ rad/seg}$$

- Construcción del polígono de aceleración.

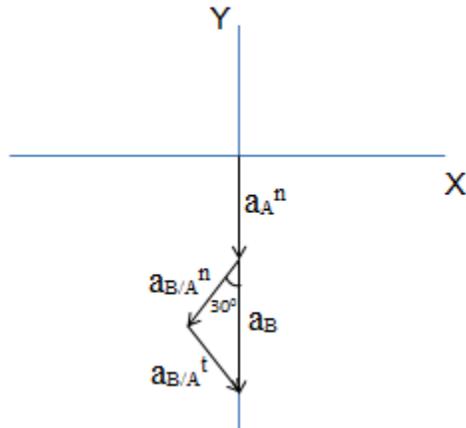


Fig. 2.8: Representación gráfica del comportamiento de las aceleraciones.

$$\text{I) } a_B = a_A^n + a_{B/A}^n \cdot \cos 30^\circ + a_{B/A}^t \cdot \sin 30^\circ \quad +\downarrow \quad (2.31)$$

$$\text{II) } 0 = a_{B/A}^n \cdot \sin 30^\circ - a_{B/A}^t \cdot \cos 30^\circ \quad \leftarrow + \quad (2.32)$$

$$0 = 0,19 \cdot 0,5 - a_{B/A}^t \cdot 0,87$$

$$a_{B/A}^t = \frac{0,19 \cdot 0,5}{0,87}$$

$$a_{B/A}^t = 0,11 \text{ m/s}^2$$

Sustituyendo $a_{B/A}^t = 0,11 \text{ m/s}^2$ en la ecuación (2.31), tenemos:

$$a_B = 0,397 + 0,19 \cdot \cos 30^\circ + 0,11 \cdot \sin 30^\circ$$

$$a_B = 0,397 + 0,19 \cdot 0,87 + 0,11 \cdot 0,5$$

$$a_B = 0,62 \text{ m/s}^2$$

Resultados finales:

$$v_B = 0,12 \text{ m/s}$$

$$v_A = 0,21 \text{ m/s}$$

$$v_{B/A} = 0,25 \text{ m/s}$$

$$a_B = 0,62 \text{ m/s}^2$$

$$a_A^n = 0,397 \text{ m/s}^2$$

$$a_A^t = 0$$

$$a_{B/A}^n = 0,19 \text{ m/s}^2$$

$$a_{B/A}^t = 0,11 \text{ m/s}^2$$

Posición 3:

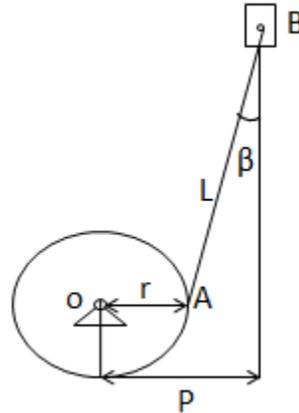


Fig. 2.9: Esquema cinemático del mecanismo para la posición dada.

Datos:

$$r = 0,12 \text{ m}$$

$$P = 0,16 \text{ m}$$

$$L = 0,32 \text{ m}$$

$$\omega_{oa} = 1,82 \text{ rad/seg}$$

I) Análisis geométrico.

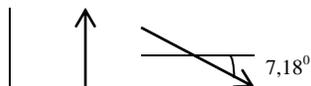
$$\beta = \sin^{-1} \frac{P-r}{L} \quad (2.33)$$

$$\beta = \sin^{-1} \frac{0,16-0,12}{0,32}$$

$$\beta = 7,18^\circ$$

II) Análisis de velocidad.

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{v}_{B/A} \quad (2.34)$$



• $v_B \rightarrow$ Magnitud desconocida.

$$\bullet v_A = \omega_{oa} * r_{oa} \quad (2.35)$$

$$v_A = 1,82 * 0,12$$

$$v_A = 0,21 \text{ m/s}$$

$$\bullet v_{B/A} = \omega_{ab} * L \rightarrow \text{Magnitud desconocida.} \quad (2.36)$$

- Construcción del polígono de velocidades.

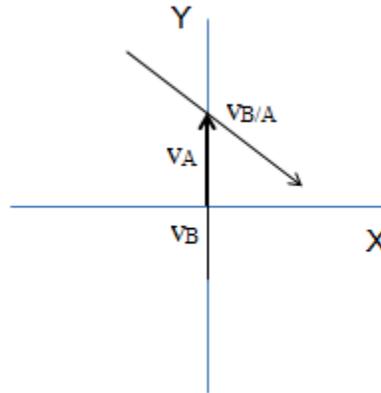


Fig. 2.10: Representación gráfica del comportamiento de las velocidades.

$$v_{B/A} = 0$$

$$v_B = v_A$$

$$v_B = 0,21 \text{ m/s}$$

III) Análisis de aceleración.

$$\rightarrow \rightarrow \rightarrow$$

$$a_B = a_A + a_{B/A} \quad (2.37)$$

$$\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow$$

$$a_B = a_A^n + a_A^t + a_{B/A}^n + a_{B/A}^t \quad (2.38)$$



$$\bullet a_B \rightarrow \text{Magnitud desconocida.}$$

$$\bullet a_A^n = (\omega_{oa})^2 * r_{oa} \quad (2.39)$$

$$a_A^n = (1,82)^2 * 0,12$$

$$a_A^n = 0,397 \text{ m/s}^2$$

$$\bullet a_A^t = 0$$

$$\bullet a_{B/A}^n = (w_{ab})^2 * L \quad (2.40)$$

$$a_{B/A}^n = (0)^2 * 0,32$$

$$a_{B/A}^n = 0$$

$$\bullet v_{B/A} = w_{ab} * L$$

$$w_{ab} = v_{B/A} / L$$

$$w_{ab} = \frac{0}{0,32}$$

$$w_{ab} = 0$$

$$\bullet a_{B/A}^t = \alpha_{ab} * L \longrightarrow \text{Magnitud desconocida.} \quad (2.41)$$

- Construcción del polígono de aceleración.

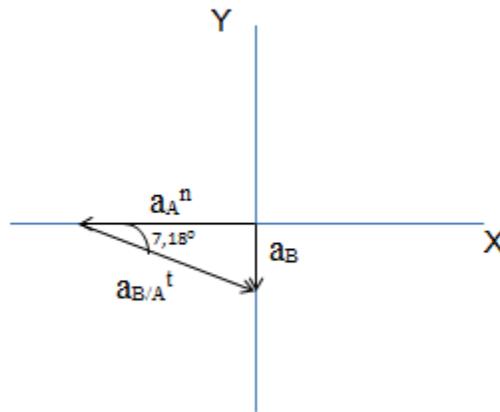


Fig. 2.11: Representación gráfica del comportamiento de las aceleraciones.

$$\text{I) } a_B = a_{B/A}^t * \sin 7,18^0 \quad + \downarrow \quad (2.42)$$

$$\text{II) } 0 = a_{B/A}^n - a_{B/A}^t * \cos 7,18^0 \quad \leftarrow + \quad (2.43)$$

$$0 = 0,397 - a_{B/A}^t * 0,99$$

$$a_{B/A}^t = 0,397 / 0,99$$

$$a_{B/A}^t = 0,40 \text{ m/s}^2$$

Sustituyendo $a_{B/A}^t = 0,40 \text{ m/s}^2$ en la ecuación (2.42), tenemos:

$$a_B = 0,40 * \sin 7,18^0$$

$$a_B = 0,04 \text{ m/s}^2$$

Resultados finales:

$$v_B = 0,21 \text{ m/s}$$

$$v_A = 0,21 \text{ m/s}$$

$$v_{B/A} = 0$$

$$a_B = 0,04 \text{ m/s}^2$$

$$a_A^n = 0,397 \text{ m/s}^2$$

$$a_A^t = 0$$

$$a_{B/A}^n = 0 \text{ m/s}^2$$

$$a_{B/A}^t = 0,40 \text{ m/s}^2$$

Posición 4:

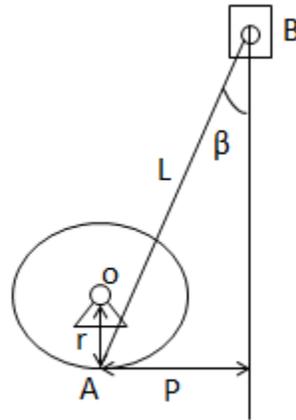


Fig. 2.12: Esquema cinemático del mecanismo para la posición dada.

Datos:

$$r = 0,12 \text{ m}$$

$$L = 0,32 \text{ m}$$

$$P = 0,16 \text{ m}$$

$$\omega_{oa} = 1,82 \text{ rad/seg}$$

I) Análisis geométrico.

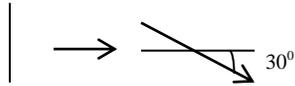
$$\beta = \sin^{-1} \frac{P}{L} \quad (2.44)$$

$$\beta = \sin^{-1} \frac{0,16}{0,32}$$

$$\beta = 30^0$$

II) Análisis de velocidad.

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{v}_{B/A} \quad (2.45)$$



• $v_B \rightarrow$ Magnitud desconocida.

$$\bullet v_A = \omega_{oa} * r_{oa} \quad (2.46)$$

$$v_A = 1,82 * 0,12$$

$$v_A = 0,21 \text{ m/s}$$

$$\bullet v_{B/A} = \omega_{ab} * L \rightarrow \text{Magnitud desconocida.} \quad (2.47)$$

- Construcción del polígono de velocidad.

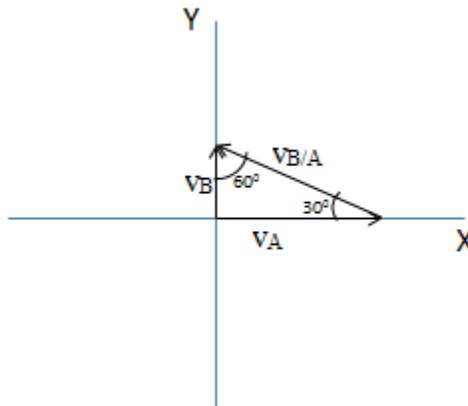


Fig. 2.13: Representación gráfica del comportamiento de las velocidades.

$$\frac{v_B}{\sin 30^\circ} = \frac{v_{B/A}}{\sin 90^\circ} = \frac{v_A}{\sin 60^\circ} \quad (2.48)$$

$$\bullet v_B = \frac{\sin 30^\circ * v_A}{\sin 60^\circ} \quad (2.49)$$

$$v_B = \frac{0,5 * 0,21}{0,87}$$

$$v_B = 0,12 \text{ m/s}$$

$$\bullet v_{B/A} = \frac{\sin 90^\circ * v_A}{\sin 60^\circ} \quad (2.50)$$

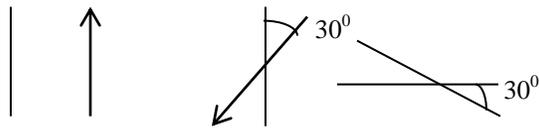
$$v_{B/A} = \frac{1 \cdot 0,21}{0,87}$$

$$v_{B/A} = 0,25 \text{ m/s}$$

III) Análisis de aceleración.

$$\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}_{B/A} \quad (2.51)$$

$$\vec{a}_B = \vec{a}_A^n + \vec{a}_A^t + \vec{a}_{B/A}^n + \vec{a}_{B/A}^t \quad (2.52)$$



• $a_B \rightarrow$ Magnitud desconocida.

$$\bullet a_A^n = (\omega_{oa})^2 * r_{oa} \quad (2.53)$$

$$a_A^n = (1,82)^2 * 0,12$$

$$a_A^n = 0,397 \text{ m/s}^2$$

$$\bullet a_A^t = 0$$

$$\bullet a_{B/A}^n = (\omega_{ab})^2 * L \quad (2.54)$$

$$a_{B/A}^n = (0,78)^2 * 0,32$$

$$a_{B/A}^n = 0,19 \text{ m/s}^2$$

$$\bullet a_{B/A}^t = \alpha_{ab} * L \rightarrow \text{Magnitud desconocida.} \quad (2.55)$$

$$\bullet v_{B/A} = \omega_{ab} * L$$

$$\omega_{ab} = v_{B/A} / L$$

$$\omega_{ab} = \frac{0,25}{0,32}$$

$$\omega_{ab} = 0,78 \text{ rad/seg}$$

- Construcción del polígono de aceleración.

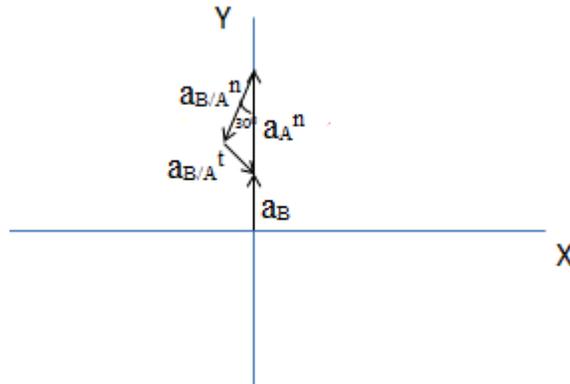


Fig. 2.14: Representación gráfica del comportamiento de las aceleraciones.

$$\text{I) } a_B = a_A^n - a_{B/A}^n \cdot \cos 30^\circ - a_{B/A}^t \cdot \sin 30^\circ \quad + \quad \uparrow \quad (2.56)$$

$$\text{II) } 0 = a_{B/A}^n \cdot \sin 30^\circ - a_{B/A}^t \cdot \cos 30^\circ \quad \leftarrow + \quad (2.57)$$

$$0 = 0,19 \cdot 0,5 - a_{B/A}^t \cdot 0,87$$

$$a_{B/A}^t = \frac{0,19 \cdot 0,5}{0,87}$$

$$a_{B/A}^t = 0,11 \text{ m/s}^2$$

Sustituyendo $a_{B/A}^t = 0,11 \text{ m/s}^2$ en la ecuación (2.56), tenemos:

$$a_B = 0,397 - 0,19 \cdot \cos 30^\circ - 0,11 \cdot \sin 30^\circ$$

$$a_B = 0,397 - 0,16 - 0,05$$

$$a_B = 0,17 \text{ m/s}^2$$

Resultados finales:

$$v_B = 0,12 \text{ m/s}$$

$$v_A = 0,21 \text{ m/s}$$

$$v_{B/A} = 0,25 \text{ m/s}$$

$$a_B = 0,17 \text{ m/s}^2$$

$$a_A^n = 0,397 \text{ m/s}^2$$

$$a_A^t = 0$$

$$a_{B/A}^n = 0,19 \text{ m/s}^2$$

$$a_{B/A}^t = 0,11 \text{ m/s}^2$$

Después de haber realizado los cálculos correspondientes a las cuatro posiciones críticas se puede apreciar que el valor de aceleración mayor corresponde al tramo comprendido entre la posición 1 y la posición 2, por lo que se hace una nueva valoración y se determina nuevos valores de aceleración.

Posición 5:

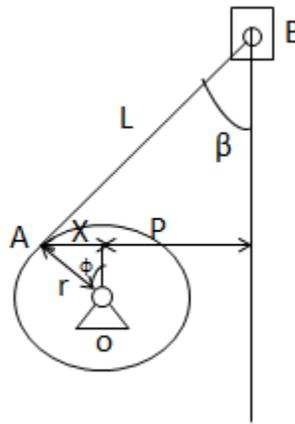


Fig. 2.15: Esquema cinemático del mecanismo para la posición dada.

Datos:

$$r = 0,12 \text{ m}$$

$$L = 0,32 \text{ m}$$

$$P = 0,16 \text{ m}$$

$$\omega_{oa} = 1,82 \text{ rad/seg}$$

$$\varphi = 60^{\circ}$$

I) Análisis geométrico.

$$\sin \varphi = \frac{x}{r} \quad (2.58)$$

$$x = \sin \varphi * r$$

$$x = \sin 60^{\circ} * 0,12$$

$$x = 0,10 \text{ m}$$

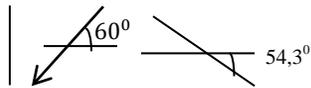
$$\beta = \sin^{-1} \frac{x+P}{L} \quad (2.59)$$

$$\beta = \sin^{-1} \frac{0,10+0,16}{0,32}$$

$$\beta = 54,3^\circ$$

II) Análisis de velocidad.

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{v}_{B/A} \quad (2.60)$$



• $v_B \rightarrow$ Magnitud desconocida.

$$\bullet v_A = \omega_{oa} * r_{oa} \quad (2.61)$$

$$v_A = 1,82 * 0,12$$

$$v_A = 0,21 \text{ m/s}$$

$$\bullet v_{B/A} = \omega_{ab} * L \rightarrow \text{Magnitud desconocida.} \quad (2.62)$$

- Construcción del polígono de velocidad.

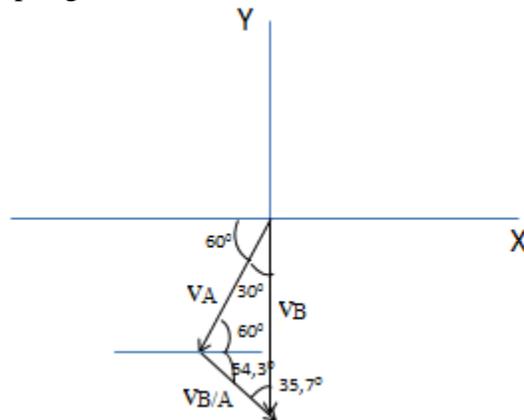


Fig. 2.16: Representación gráfica del comportamiento de las velocidades.

$$\frac{V_B}{\sin 114,3^\circ} = \frac{V_{B/A}}{\sin 30^\circ} = \frac{V_A}{\sin 35,7^\circ} \quad (2.63)$$

$$\bullet v_B = \frac{\sin 114,3^\circ * v_A}{\sin 35,7^\circ} \quad (2.64)$$

$$v_B = \frac{0,91 * 0,21}{0,58}$$

$$v_B = 0,33 \text{ m/s}$$

$$\bullet v_{B/A} = \frac{\sin 30^\circ * v_A}{\sin 35,7^\circ} \quad (2.65)$$

$$v_{B/A} = \frac{0,5 * 0,21}{0,58}$$

$$v_{B/A} = 0,18 \text{ m/s}$$

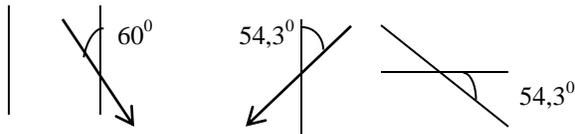
III) Análisis de aceleración.

$$\rightarrow \rightarrow \rightarrow$$

$$a_B = a_A + a_{B/A} \quad (2.66)$$

$$\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow$$

$$a_B = a_A^n + a_A^t + a_{B/A}^n + a_{B/A}^t \quad (2.67)$$



• $a_B \rightarrow$ Magnitud desconocida.

$$\bullet a_A^n = (w_{oa})^2 * r_{oa} \quad (2.68)$$

$$a_A^n = (1,82)^2 * 0,12$$

$$a_A^n = 0,39 \text{ m/s}^2$$

$$\bullet a_A^t = 0$$

$$\bullet a_{B/A}^n = (w_{ab})^2 * L \quad (2.69)$$

$$a_{B/A}^n = (0,56)^2 * 0,32$$

$$a_{B/A}^n = 0,1 \text{ m/s}^2$$

$$\bullet v_{B/A} = w_{ab} * L$$

$$w_{ab} = v_{B/A} / L$$

$$w_{ab} = \frac{0,18}{0,32}$$

$$w_{ab} = 1,1 \text{ rad/seg}$$

$$\bullet a_{B/A}^t = \alpha_{ab} * L \rightarrow \text{Magnitud desconocida.} \quad (2.70)$$

- Construcción del polígono de aceleración.

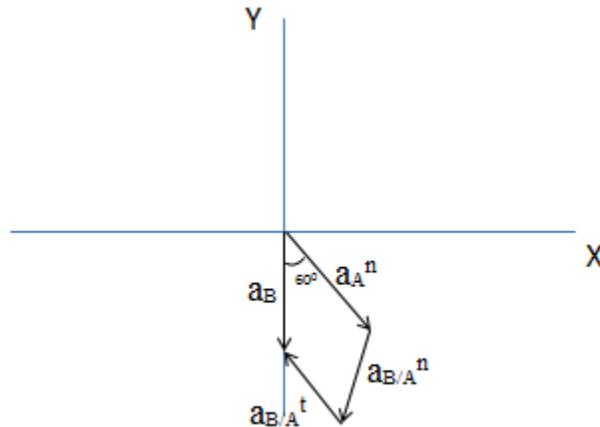


Fig. 2.17: Representación gráfica del comportamiento de las aceleraciones.

$$\text{I) } a_B = a_A^n \cdot \cos 60^\circ + a_{B/A}^n \cdot \cos 54,3^\circ - a_{B/A}^t \cdot \sin 54,3^\circ \quad + \downarrow \quad (2.71)$$

$$\text{II) } 0 = a_A^n \cdot \sin 60^\circ - a_{B/A}^n \cdot \sin 54,3^\circ - a_{B/A}^t \cdot \cos 54,3^\circ \quad + \rightarrow \quad (2.72)$$

$$0 = 0,39 \cdot 0,87 - 0,38 \cdot 0,81 - a_{B/A}^t \cdot 0,58$$

$$a_{B/A}^t = \frac{0,39 \cdot 0,87 - 0,1 \cdot 0,81}{0,58}$$

$$a_{B/A}^t = 0,45 \text{ m/s}^2$$

Sustituyendo $a_{B/A}^t = 0,45 \text{ m/s}^2$ en la ecuación (2.71), tenemos:

$$a_B = 0,39 \cdot 0,5 + 0,1 \cdot 0,58 - 0,45 \cdot 0,81$$

$$a_B = 0,195 + 0,06 - 0,36$$

$$a_B = -0,10 \text{ m/s}^2$$

$$a_B = 0,10 \text{ m/s}^2 \quad \uparrow$$

Resultados finales:

$$v_B = 0,33 \text{ m/s}$$

$$v_A = 0,21 \text{ m/s}$$

$$v_{B/A} = 0,18 \text{ m/s}$$

$$a_B = 0,10 \text{ m/s}^2$$

$$a_A^n = 0,39 \text{ m/s}^2$$

$$a_A^t = 0$$

$$a_{B/A}^n = 0,1 \text{ m/s}^2$$

$$a_{B/A}^t = 0,45 \text{ m/s}^2$$

Posición 6:

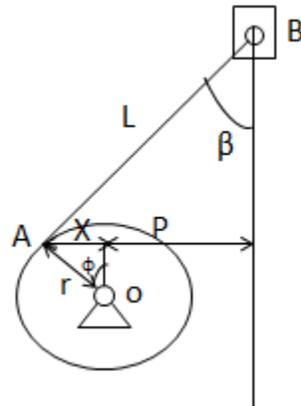


Fig. 2.18: Esquema cinemático del mecanismo para la posición dada.

Datos:

$$r = 0,12 \text{ m}$$

$$L = 0,32 \text{ m}$$

$$P = 0,16 \text{ m}$$

$$\omega_{oa} = 1,82 \text{ rad/seg}$$

$$\varphi = 30^\circ$$

I) Análisis geométrico.

$$\sin \varphi = \frac{x}{r} \quad (2.73)$$

$$x = \sin \varphi * r$$

$$x = \sin 30^\circ * 0,12$$

$$x = 0,06 \text{ m}$$

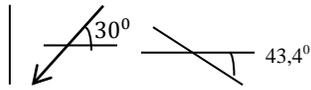
$$\beta = \sin^{-1} \frac{x+P}{L} \quad (2.74)$$

$$\beta = \sin^{-1} \frac{0,06+0,16}{0,32}$$

$$\beta = 43,4^\circ$$

II) Análisis de velocidad.

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{v}_{B/A} \quad (2.75)$$



• $v_B \rightarrow$ Magnitud desconocida.

$$\bullet v_A = \omega_{oa} * r_{oa} \quad (2.76)$$

$$v_A = 1,82 * 0,12$$

$$v_A = 0,21 \text{ m/s}$$

$$\bullet v_{B/A} = \omega_{ab} * L \rightarrow \text{Magnitud desconocida.} \quad (2.77)$$

- Construcción del polígono de velocidad.

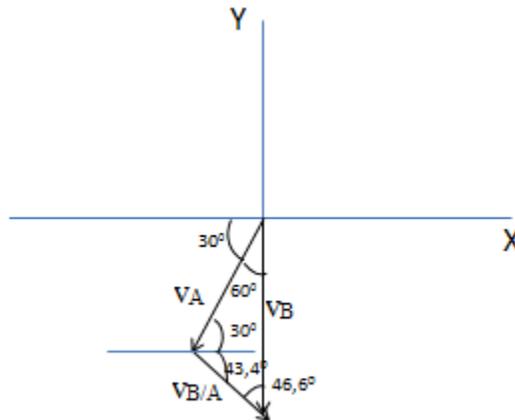


Fig. 2.19: Representación gráfica del comportamiento de las velocidades.

$$\frac{v_B}{\sin 73,4^\circ} = \frac{v_{B/A}}{\sin 60^\circ} = \frac{v_A}{\sin 46,6^\circ} \quad (2.78)$$

$$\bullet v_B = \frac{\sin 73,4^\circ * v_A}{\sin 46,6^\circ} \quad (2.79)$$

$$v_B = \frac{0,96 * 0,21}{0,73}$$

$$v_B = 0,29 \text{ m/s}$$

$$\bullet v_{B/A} = \frac{\sin 60^\circ * V_A}{\sin 46,6^\circ} \quad (2.80)$$

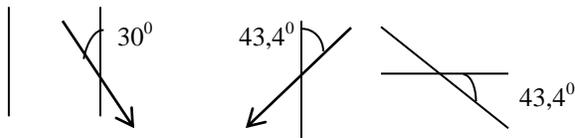
$$v_{B/A} = \frac{0,87 * 0,21}{0,73}$$

$$v_{B/A} = 0,26 \text{ m/s}$$

III) Análisis de aceleración.

$$\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}_{B/A} \quad (2.81)$$

$$\vec{a}_B = \vec{a}_A^n + \vec{a}_A^t + \vec{a}_{B/A}^n + \vec{a}_{B/A}^t \quad (2.82)$$



• $a_B \rightarrow$ Magnitud desconocida.

$$\bullet a_A^n = (w_{oa})^2 * r_{oa} \quad (2.83)$$

$$a_A^n = (1,82)^2 * 0,12$$

$$a_A^n = 0,39 \text{ m/s}^2$$

$$\bullet a_A^t = 0$$

$$\bullet a_{B/A}^n = (w_{ab})^2 * L \quad (2.84)$$

$$a_{B/A}^n = (0,81)^2 * 0,32$$

$$a_{B/A}^n = 0,21 \text{ m/s}^2$$

$$\bullet v_{B/A} = w_{ab} * L$$

$$w_{ab} = v_{B/A} / L$$

$$w_{ab} = \frac{0,26}{0,32}$$

$$w_{ab} = 0,81 \text{ rad/seg}$$

$$\bullet a_{B/A}^t = \alpha_{ab} * L \rightarrow \text{Magnitud desconocida.} \quad (2.85)$$

- Construcción del polígono de aceleración.

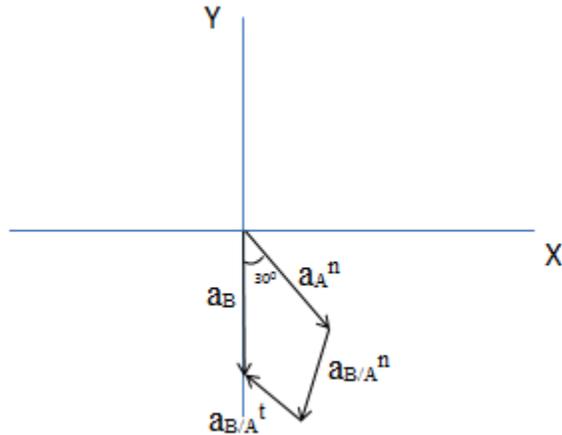


Fig. 2.20: Representación gráfica del comportamiento de las aceleraciones.

$$\text{I) } a_B = a_A^n \cdot \cos 30^\circ + a_{B/A}^n \cdot \cos 43,4^\circ - a_{B/A}^t \cdot \sin 43,4^\circ \quad + \downarrow \quad (2.86)$$

$$\text{II) } 0 = a_A^n \cdot \sin 30^\circ - a_{B/A}^n \cdot \sin 43,4^\circ - a_{B/A}^t \cdot \cos 43,4^\circ \quad + \rightarrow \quad (2.87)$$

$$0 = 0,39 \cdot 0,5 - 0,21 \cdot 0,69 - a_{B/A}^t \cdot 0,73$$

$$a_{B/A}^t = \frac{0,39 \cdot 0,5 - 0,21 \cdot 0,69}{0,73}$$

$$a_{B/A}^t = 0,07 \text{ m/s}^2$$

Sustituyendo $a_{B/A}^t = 0,07 \text{ m/s}^2$ en la ecuación (2.86), tenemos:

$$a_B = 0,39 \cdot 0,87 + 0,21 \cdot 0,73 - 0,07 \cdot 0,69$$

$$a_B = 0,34 + 0,15 - 0,05$$

$$a_B = 0,44 \text{ m/s}^2$$

Resultados finales:

$$v_B = 0,29 \text{ m/s}$$

$$v_A = 0,21 \text{ m/s}$$

$$v_{B/A} = 0,26 \text{ m/s}$$

$$a_B = 0,44 \text{ m/s}^2$$

$$a_A^n = 0,39 \text{ m/s}^2$$

$$a_A^t = 0$$

$$a_{B/A}^n = 0,21 \text{ m/s}^2$$

$$a_{B/A}^t = 0,07 \text{ m/s}^2$$

Después de verificar las posiciones anteriores se llega a la conclusión que el valor máximo de aceleración corresponde al de la posición 1 por lo cual es el que tomamos para el cálculo de la fuerza de inercia.

$$F.I = m * a \quad (2.88)$$

➤ m (masa del vástago)

.El vástago compuesto por 3 elementos distintos:

- varilla de ϕ 14 mm, 8.50 m de longitud y con una masa de 5.1 Kg.

- tubo de ϕ 1'', 3 m de longitud y con una masa de 6.6 Kg.

- varilla de ϕ 14 mm, 0,05 m de longitud y con una masa de 0.55 Kg, esta varilla es la que se enrosca en el mecanismo de transmisión.

Sumando las tres masas se obtienen la masa total del vástago.

$$m = m_{v1} + m_t + m_{v2} \quad (2.89)$$

$$m = 5.1 \text{ Kg} + 6.6 \text{ Kg} + 0.55 \text{ Kg}$$

$$m = 12.25 \text{ Kg}$$

➤ $a = 0,72 \text{ m/s}^2$

Sustituyendo estos valores en la ecuación 2.88:

$$F.I = 12.25 \text{ Kg} * 0,72 \text{ m/s}^2$$

$$F.I = 8.82 \text{ N}$$

CONCLUSIONES PARCIALES:

- 1- El valor máximo de la aceleración se encuentra en la posición 1, su valor es de 0,72m/s²
- 2- Para el valor de la aceleración presentada en conclusión 1, se alcanza una fuerza de inercia de 8,82N.

CAPÍTULO III

CHEQUEO DE RESISTENCIA

CAPÍTULO III: CHEQUEO DE RESISTENCIA

El cálculo de resistencia es uno de los factores más importante que tiene la estructura a analizar. La viga cuestionada es del tipo (angular de alas iguales), es la última de las tres vigas que se encuentra sujetando el bajante por el cuál fluye el agua, esta viga tiene una longitud de 1,70 m, es del tipo L 51 X 51 X 3,2 mm y se encuentra separada del suelo a una distancia de 2,12 m, la unión entre la viga y el bajante se realiza mediante una presilla situada en el centro de la viga, en sus extremos la viga está atornillada por tornillos de ϕ 10 mm a otras vigas que conforman la estructura.

Este capítulo incluye los fundamentos del cálculo por resistencia mecánica a la viga cuestionada, asumiendo en un primer momento que la viga se encuentra situada en dos apoyos articulados fijos.

3.1 PROPIEDADES QUÍMICAS Y MECÁNICAS DE LA VIGA CUESTIONADA:

Como en la UBPC se desconocía el tipo de material que presentaba la viga, se tomó una pequeña muestra y se concibieron los análisis químicos en la empresa Planta Mecánica de Villa Clara (ver anexo VIII), de este análisis se concluyó que el material de la viga es un acero C60.

Conociendo ya las propiedades químicas del material se prosigue a la búsqueda de sus propiedades mecánicas, para desarrollar el chequeo de resistencia según los diferentes apoyos asumidos anteriormente.

Tabla 3.1: Propiedades mecánicas del material [6].

$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	σ_y (MPa)	$[\sigma]$ (MPa)	n	Sx (mm ³)	Ix (mm ⁴)	E (MPa)	v (m/s)
620	485	σ_y / n	3	2,15*10 ³	0,0791*10 ⁶	2*10 ⁵	0,33

Nomenclatura:

$\sigma_{m\acute{a}x}$: Tensión máxima.

σ_y : Tensión de fluencia.

[σ]: Tensión admisible.

n: Factor de seguridad.

Sx: Módulo de la sección a flexión a flexión (depende de la sección transversal).

Ix: Momento de inercia.

E: Módulo de elasticidad del material.

v: Velocidad.

Para cimentaciones superficiales, dicho factor de seguridad suele tomarse con valor $n=3$, aunque en ciertos casos, si se conocen con más precisión los parámetros resistentes del terreno y las cargas que se van a aplicar, pueden justificarse valores menores [7].

3.2 CÁLCULO DE RESISTENCIA:

Para realizar el chequeo de resistencia de la viga hay que tener en cuenta todas las masas que interactúan, para comprender la fuerza que está actuando sobre ella.

- masa del tubo principal (m.t.p): 23,1 Kg

- masa del vástago (m.v): 12,25 Kg

- masa del cheque (m.c): 2,9 Kg

- masa del tubo que succiona el agua del río (m.t.r): 11,55 Kg

-masa del tubo de la descarga (m.t.d): 2,40 Kg

$$\text{Masa total } m_T = m.t.p + m.v + m.c + m.t.r + m.t.d \quad (3.1)$$

$$m_T = 23,1 \text{ Kg} + 12,25 \text{ Kg} + 2,9 \text{ Kg} + 11,55 \text{ Kg} + 2,40 \text{ Kg}$$

$$m_T = 52,20 \text{ Kg}$$

$$\text{Fuerza total } P = (m_T * g) + F.I \quad (3.2)$$

$$P = (52,20 \text{ Kg} * 9,81 \text{ m/s}^2) + 8,82 \text{ N}$$

$$P = 521 \text{ N}$$

3.2.1 CÁLCULO DE RESISTENCIA DE LA VIGA TENIENDO EN CUENTA LOS DOS APOYOS COMO ARTICULADOS FIJOS:

Representación esquemática del comportamiento de la fuerza Cortante (Q) y el momento Flector (Mf).

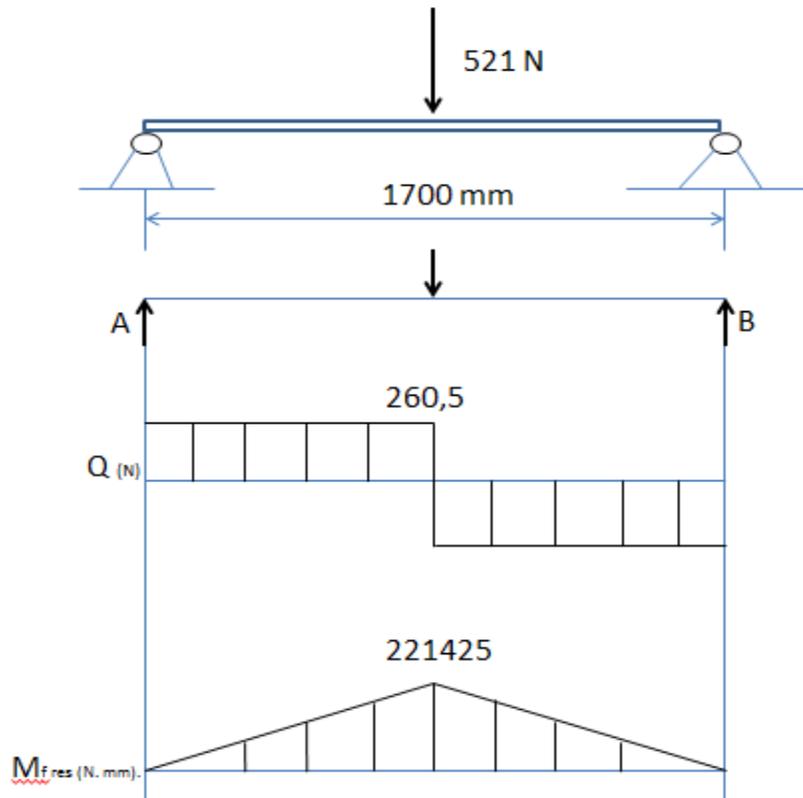


Fig. 3.1: Representación gráfica del comportamiento de la fuerza para los dos apoyos articulados fijo.

-Cálculo de las reacciones en los apoyos.

$$\bullet \sum M_A = 0 \quad + \quad \uparrow \quad (3.3)$$

$$B * 1700 \text{ mm} - 521 \text{ N} * 850 \text{ mm} = 0$$

$$B = (521 \text{ N} * 850 \text{ mm}) / 1700 \text{ mm}$$

$$B = 260,5 \text{ N}$$

-Cálculo de las tensiones máximas y chequeo de la resistencia.

- $\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{Mf_{m\acute{a}x}}{S_x} \leq [\sigma]$ (3.4)

- $[\sigma] = \sigma_y / n$ (3.5)

$$[\sigma] = 485 \text{ MPa} / 3$$

$$[\sigma] = 162 \text{ MPa}$$

Sustituyendo los valores de momento flector máximo ($Mf_{m\acute{a}x}$) y el del módulo de la sección a flexión (S_x) (tabla 3.1) en la ecuación 3.4 tenemos que:

- $\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{221425 \text{ N}\cdot\text{mm}}{2,15 \cdot 10^3 \text{ mm}^3} \leq 162 \text{ MPa}$

103 MPa < 162 MPa La viga resiste la carga aplicada.

Como se pudo apreciar en los cálculos, la viga resiste teniendo en cuenta como apoyo dos articulados fijos.

3.2.2 CÁLCULO DE RESISTENCIA DE LA VIGA TENIENDO EN CUENTA QUE ESTA EMPOTRADA EN LOS DOS ESTREMOS:

Considerando que para las condiciones de trabajo asumidas en el epografe anterior, el sistema cumple con la condición de resistencia y conociendo que en realidad el sistema falla, se decide realizar los cálculos asumiendo la viga empotrada en los dos extremos.

Representación esquemática.

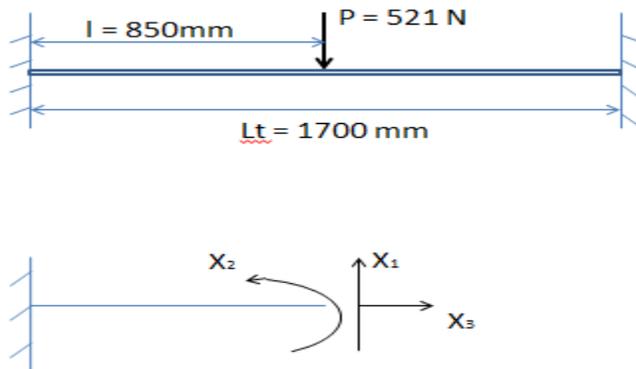


Fig. 3.2: Representación gráfica del sistema cuando está empotrada en sus extremos.

Ecuaciones canónicas:

$$\delta_{11} X_1 + \delta_{12} X_2 + \delta_{13} X_3 + \delta_{1p} = 0 \quad (3.6)$$

$$\delta_{21} X_1 + \delta_{22} X_2 + \delta_{23} X_3 + \delta_{2p} = 0 \quad (3.7)$$

$$\delta_{31} X_1 + \delta_{32} X_2 + \delta_{33} X_3 + \delta_{3p} = 0 \quad (3.8)$$

Como $X_3 = 0$ las ecuaciones quedan de la siguiente manera.

$$\delta_{11} X_1 + \delta_{12} X_2 + \delta_{1p} = 0 \quad (3.9)$$

$$\delta_{21} X_1 + \delta_{22} X_2 + \delta_{2p} = 0 \quad (3.10)$$

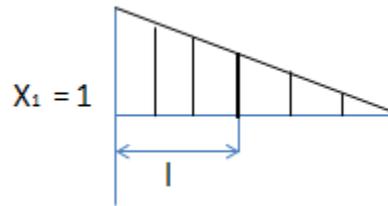


Fig. 3.3: Comportamiento de X_1 .

$$\bullet \delta_{11} = \text{triángulo} * \text{triángulo} \quad (3.11)$$

$$\delta_{11} = \frac{h*s*Lt}{3}$$

$$\delta_{11} = \frac{1,7*1,7*1,7}{3}$$

$$\delta_{11} = 1,637 \text{ m}^3$$

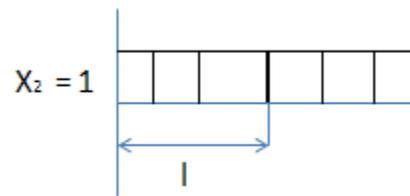


Fig. 3.4: Comportamiento de X_2 .

- $\delta_{22} = \square * \square$ (3.12)

$$\delta_{22} = h * s * Lt$$

$$\delta_{22} = 1 * 1 * 1,7$$

$$\delta_{22} = 1,7 \text{ m}$$

- $\delta_{12} = \delta_{21} = \triangle * \square$ (3.13)

$$\delta_{12} = \delta_{21} = \frac{h*s*Lt}{2}$$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = \frac{1,7*1*1,7}{2}$$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = 1,445 \text{ m}^2$$

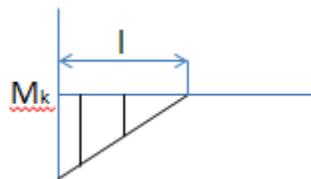


Fig. 3.5: Comportamiento de M_k

- $\delta_{1p} = - \triangle * \square$ (3.14)

$$\delta_{1p} = - \frac{h*l}{6} * (2*S_1 + S_2)$$

$$\delta_{1p} = - \frac{442,85*0,850}{6} * (2 * 1,7 + 0,85)$$

$$\delta_{1p} = - 62,737 * 4,25$$

$$\delta_{1p} = - 266,6 \text{ N*m}^3$$

- $\delta_{2p} = - \square * \triangle$ (3.15)

$$\delta_{2p} = - \frac{h*s*l}{2}$$

$$\delta_{2p} = - \frac{442,85*1*0,85}{2}$$

$$\delta_{2p} = -188,2 \text{ N}\cdot\text{m}^2$$

Sustituyendo estos valores en las ecuaciones 3.9 y 3.10 se tiene que:

$$1,637 X_1 + 1,445 X_2 - 266,6 = 0 \quad (\text{I})$$

$$1,445 X_1 + 1,7 X_2 - 188,8 = 0 \quad (\text{II})$$

Multiplicando la ecuación I por -1 y la II por 0,85:

$$\begin{array}{r} -1,637 X_1 - 1,445 X_2 + 266,6 = 0 \\ 1,22825 X_1 + 1,445 X_2 - 159,97 = 0 \\ \hline \end{array}$$

$$-0,40875 X_1 = -106,63$$

$$X_1 = \frac{106,63}{0,40875}$$

$$X_1 = 260 \text{ N}$$

Sustituyendo $X_1 = 260,86$ en la ecuación I se tiene que:

$$1,637 \cdot (260) + 1,445 X_2 - 266,6 = 0$$

$$425,62 + 1,445 X_2 - 266,6 = 0$$

$$159,02 + 1,445 X_2 = 0$$

$$X_2 = -\frac{159,02}{1,445}$$

$$X_2 = -110 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Representando en las figuras 3.5, 3.6 y 3.7, los valores reales de X_1 , X_2 y M_K .

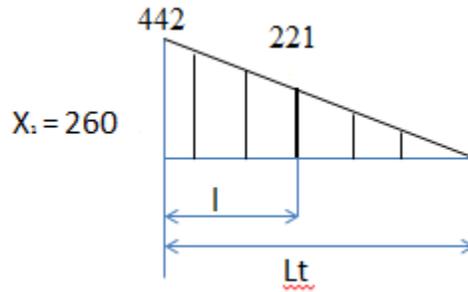


Fig. 3.6: Valores reales de X_1 .

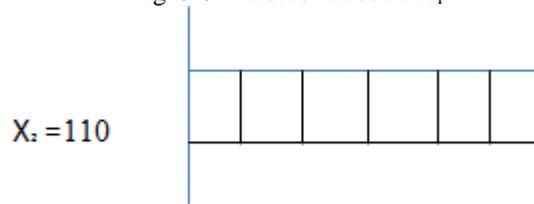


Fig. 3.7: Valores reales de X_2 .

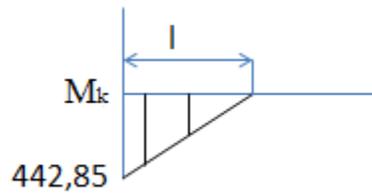


Fig. 3.8: Valores reales de M_k .

Según estos valores reales de X_1 , X_2 y M_k se prosigue a la construcción del gráfico del Momento Flector Resultante ($Mf_{m\acute{a}x}$).

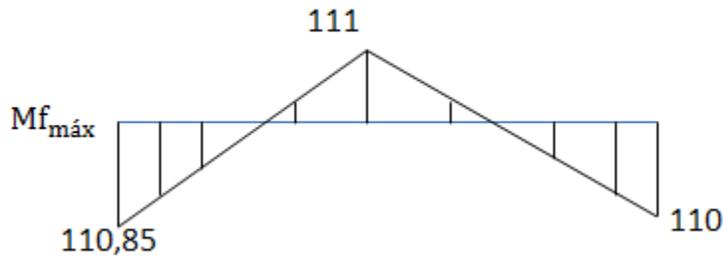


Fig. 3.9: Gráfico del Momento Flector Resultante.

Como se puede apreciar en la figura 3.8, el valor máximo de Momento Flector Resultante es de 111 N*m por lo cual es el que utilizamos en la ecuación para calcular la tensión máxima.

- $$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{Mf_{m\acute{a}x}}{S_x} \leq [\sigma] \quad (3.16)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{111 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{ mm}}{2,15 \cdot 10^3 \text{ mm}^3} \leq 162 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 51,63 \text{ MPa} < 162 \text{ Mpa}$$

La viga resiste la carga aplicada.

Después de haber realizado los dos chequeos de resistencia a la viga de estudio se puede destacar que ambos chequeos dan como resultados que la viga resiste teniendo en cuenta apoyos diferentes.

3.2.3 DETERMINACIÓN DE LAS TENSIONES APLICANDO SOFTWARE PROFESIONAL SOLIDWORKS:

También se hicieron chequeos haciendo uso de software profesional Solidworks, dichos resultados se presentan a continuación:

a-Considerando apoyos articulados fijo.

En la figura 3.10 se presenta las condiciones de carga y apoyos utilizadas durante la aplicación del software.

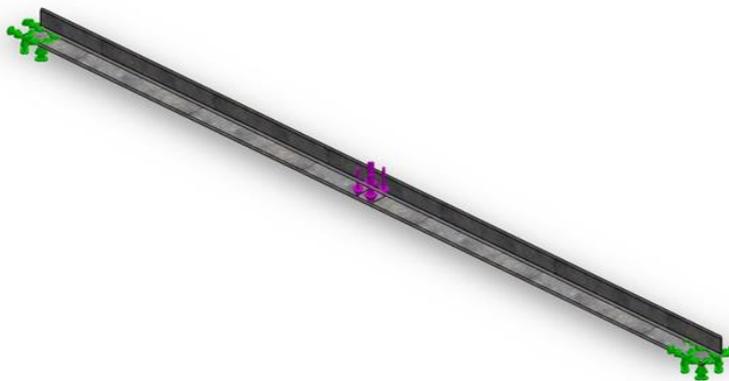


Fig. 3.10: Aplicación de la carga en la viga de estudio.

En las figuras 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14 se representan los resultados de los diferentes comportamientos de la viga teniendo en cuenta diferentes factores como:

- Tensiones equivalentes.
- Desplazamientos.
- Deformaciones equivalentes.
- Factor de seguridad.

- **Viga situada sobre sus dos apoyos como articulados fijos:**

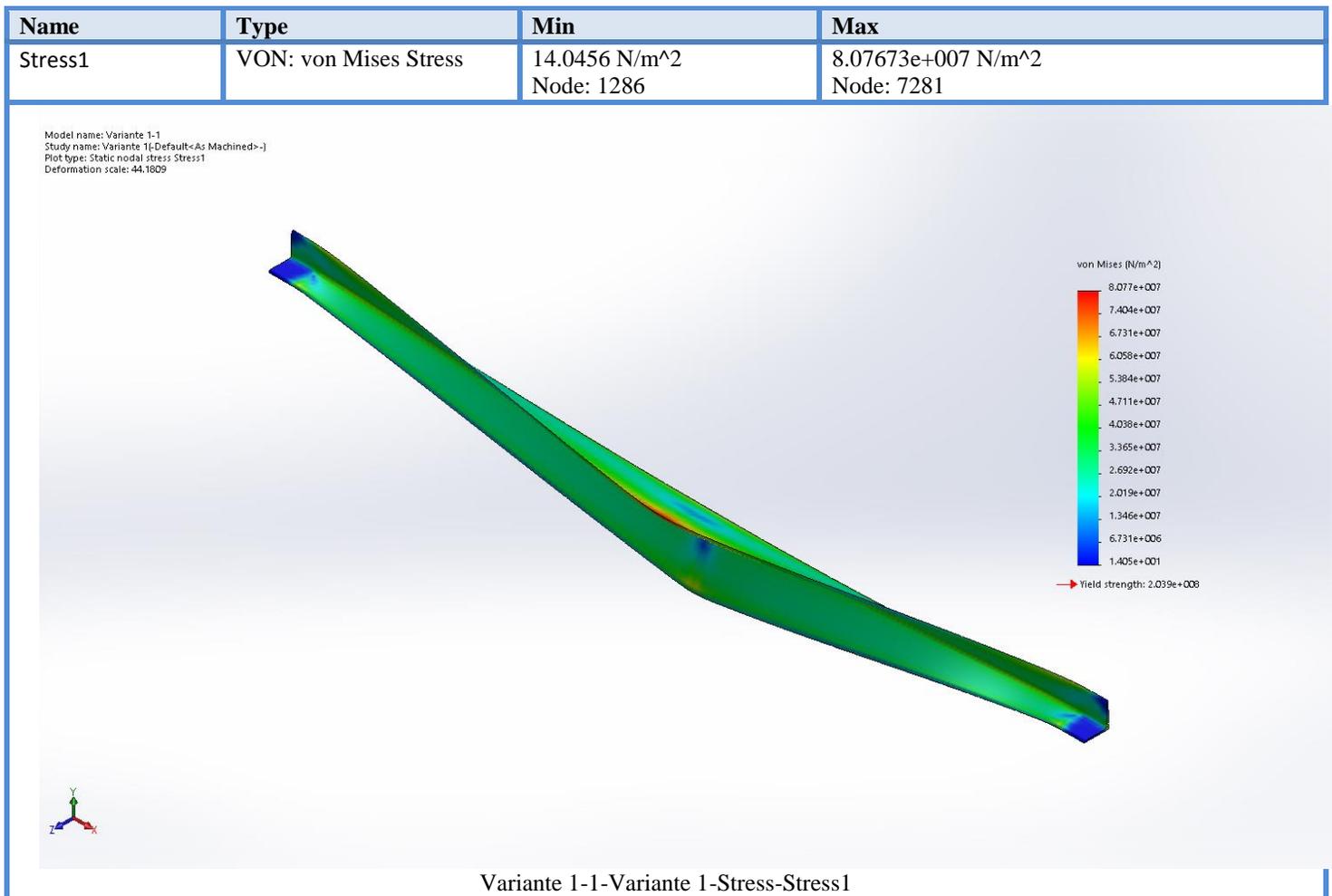


Fig. 3.11: Comportamiento de las tensiones equivalentes.

La viga de estudio presenta tensiones equivalentes que oscilan entre 14,0456 N/m² hasta 8.07673e+007 N/m², sufriendo en el nodo 7281 la máxima tensión equivalente.

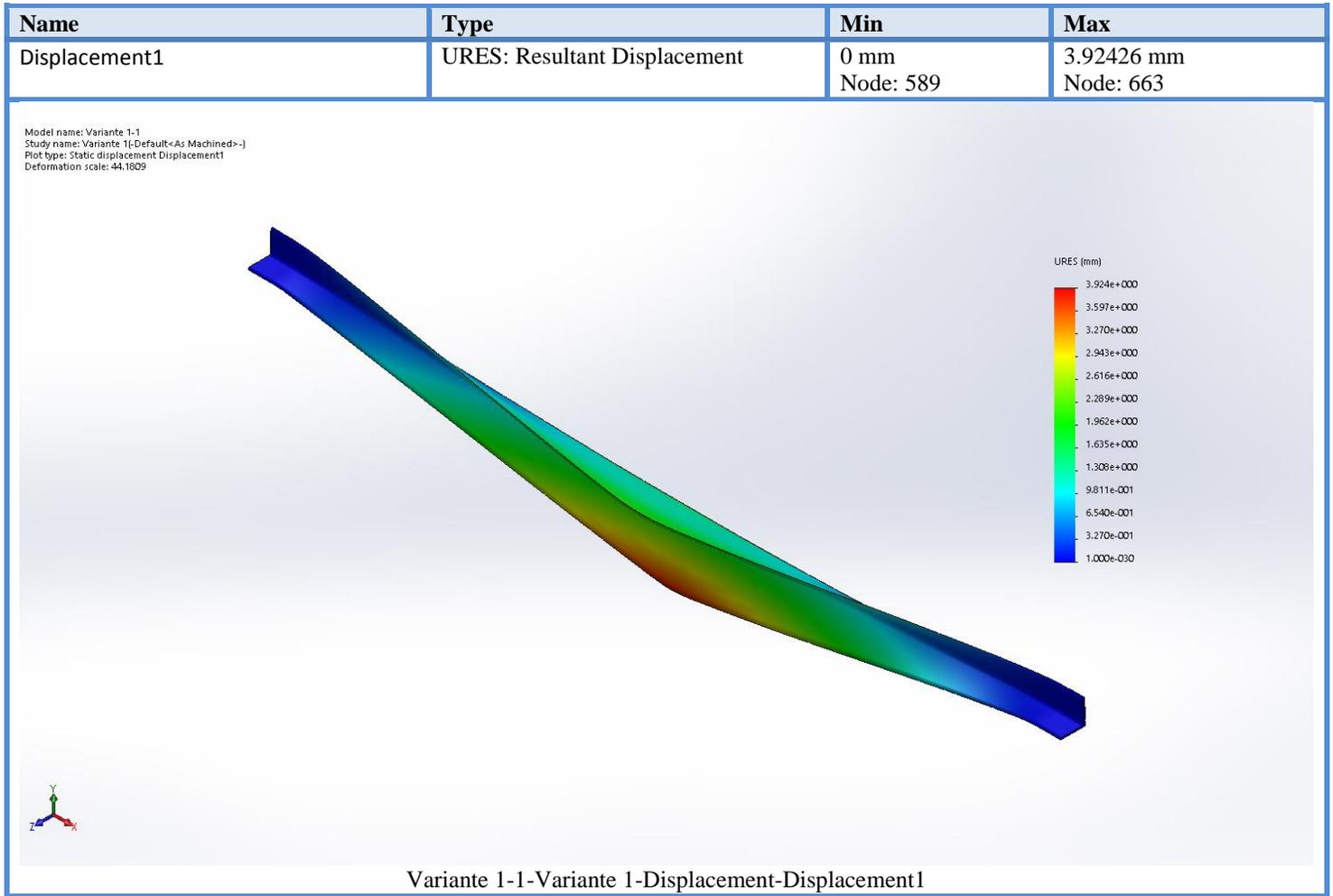


Fig. 3.12: Comportamiento del desplazamiento.

La viga presenta un máximo desplazamiento de 3.92426 mm, lo que provoca que la misma se flecte impidiendo el mejor funcionamiento del sistema.

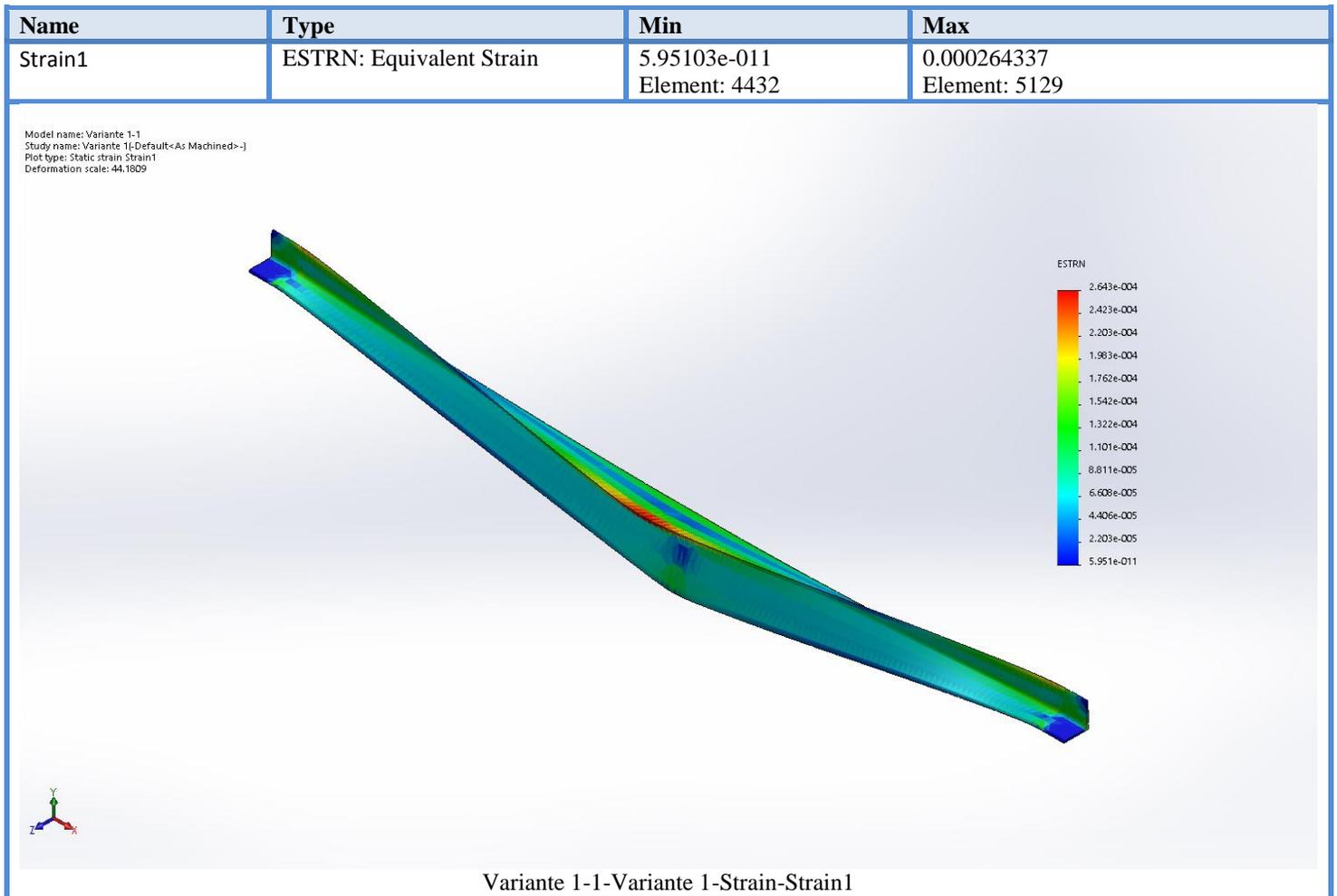


Fig. 3.13: Comportamiento de las deformaciones.

La viga presenta deformaciones equivalentes debido a la carga que soporta, el valor máximo de esta deformación es de $2,64337 * 10^{-4}$, este valor de deformación se toman adimensional porque es en relación a la longitud de la viga.

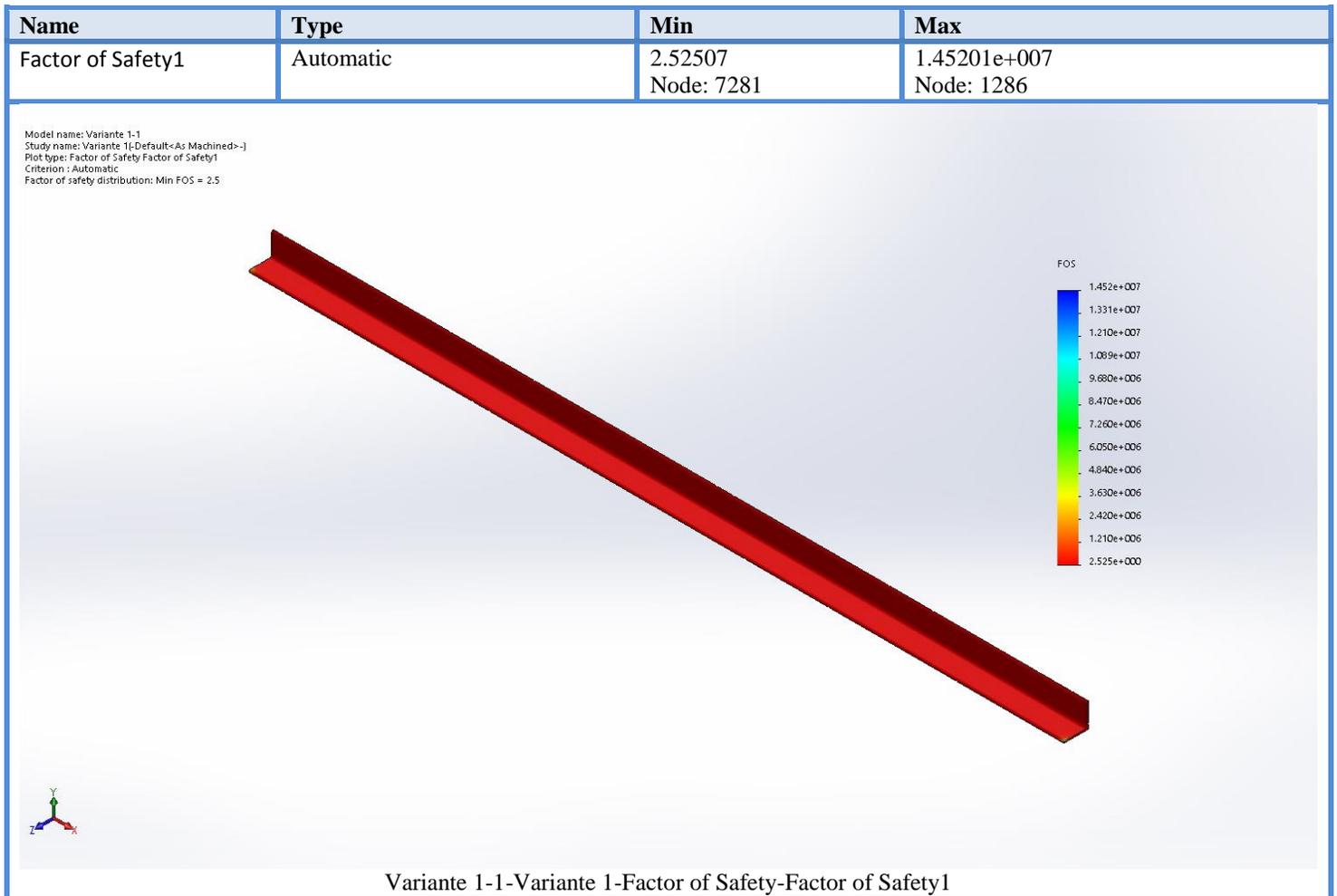


Fig. 3.14: Comportamiento del factor de seguridad.

El programa da como resultado un valor mínimo y máximo de factor de seguridad. El que se tomó para realizar los chequeos de resistencia a la viga se encuentra dentro del rango que muestra el programa.

b- Considerando que la viga se encuentra empotrada en sus extremos.

En la figura 3.15 se presenta las condiciones de carga y apoyos utilizadas durante la aplicación del software.

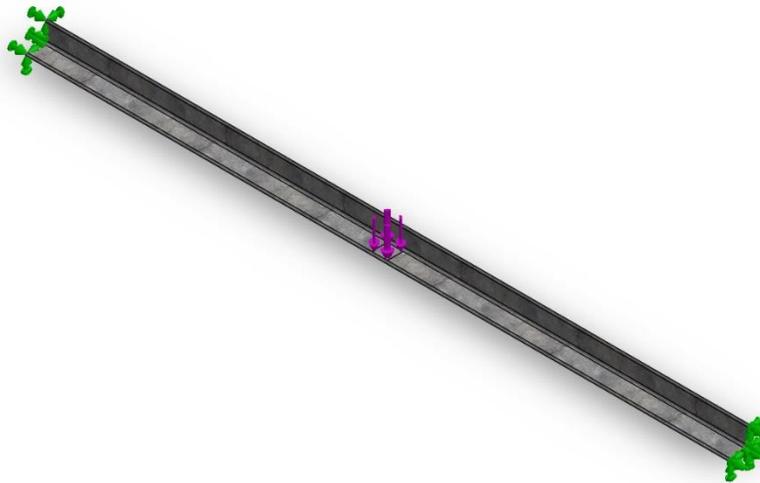


Fig. 3.15: Aplicación de la carga en la viga de estudio.

En las figuras 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19 se representan los resultados de los diferentes comportamientos de la viga teniendo en cuenta diferentes factores como:

- Tensiones equivalentes.
- Desplazamientos.
- Deformaciones equivalentes.
- Factor de seguridad.

- **Viga empotrada en sus dos extremos:**

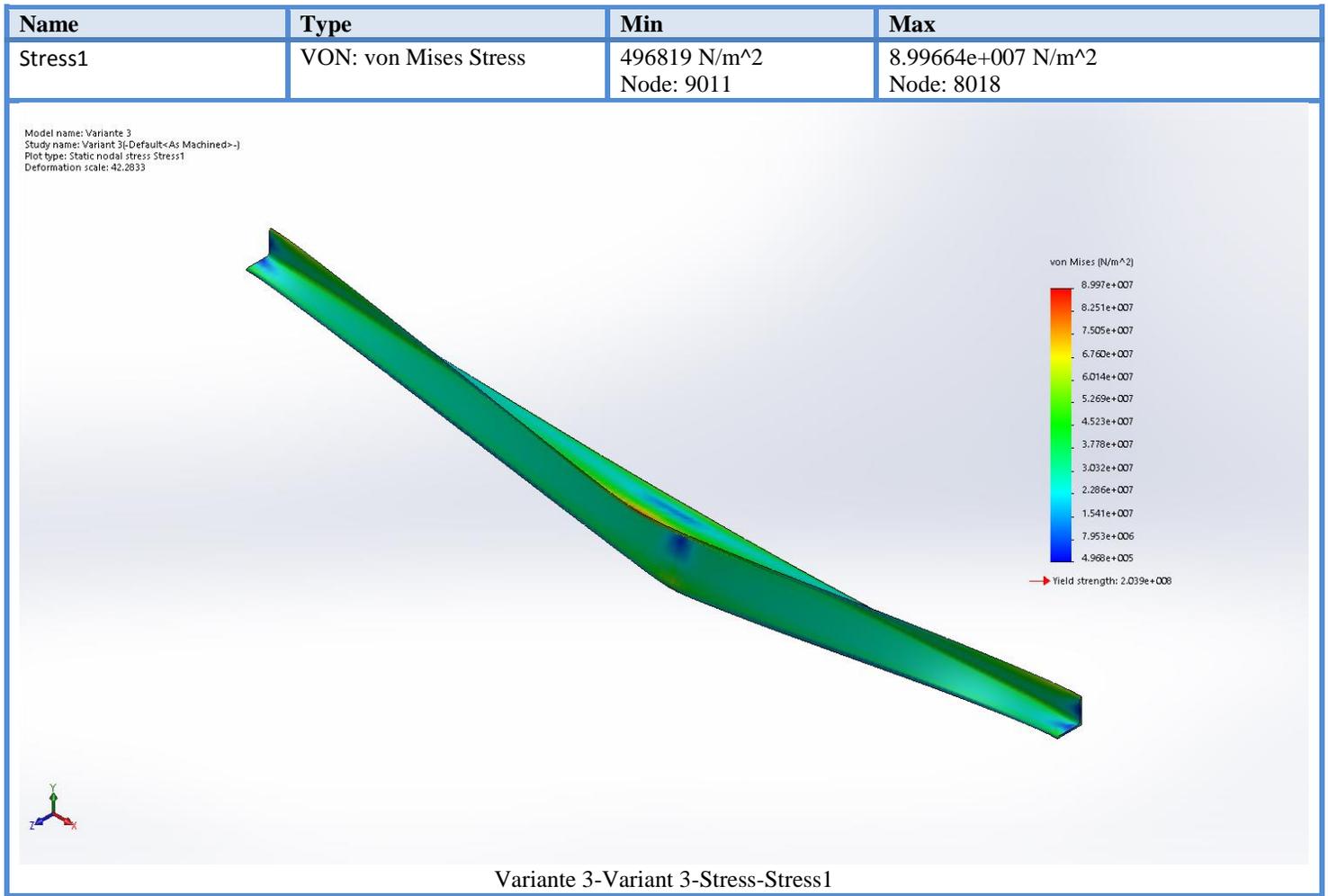


Fig. 3.16: Comportamiento de las tensiones equivalentes.

La viga de estudio presenta tensiones equivalentes que oscilan entre 496819 N/m² hasta 8.99664e+007 N/m², sufriendo en el nodo 8018 la máxima tensión equivalente. Se puede plantear que este sistema sufre mayores tensiones que el otro.

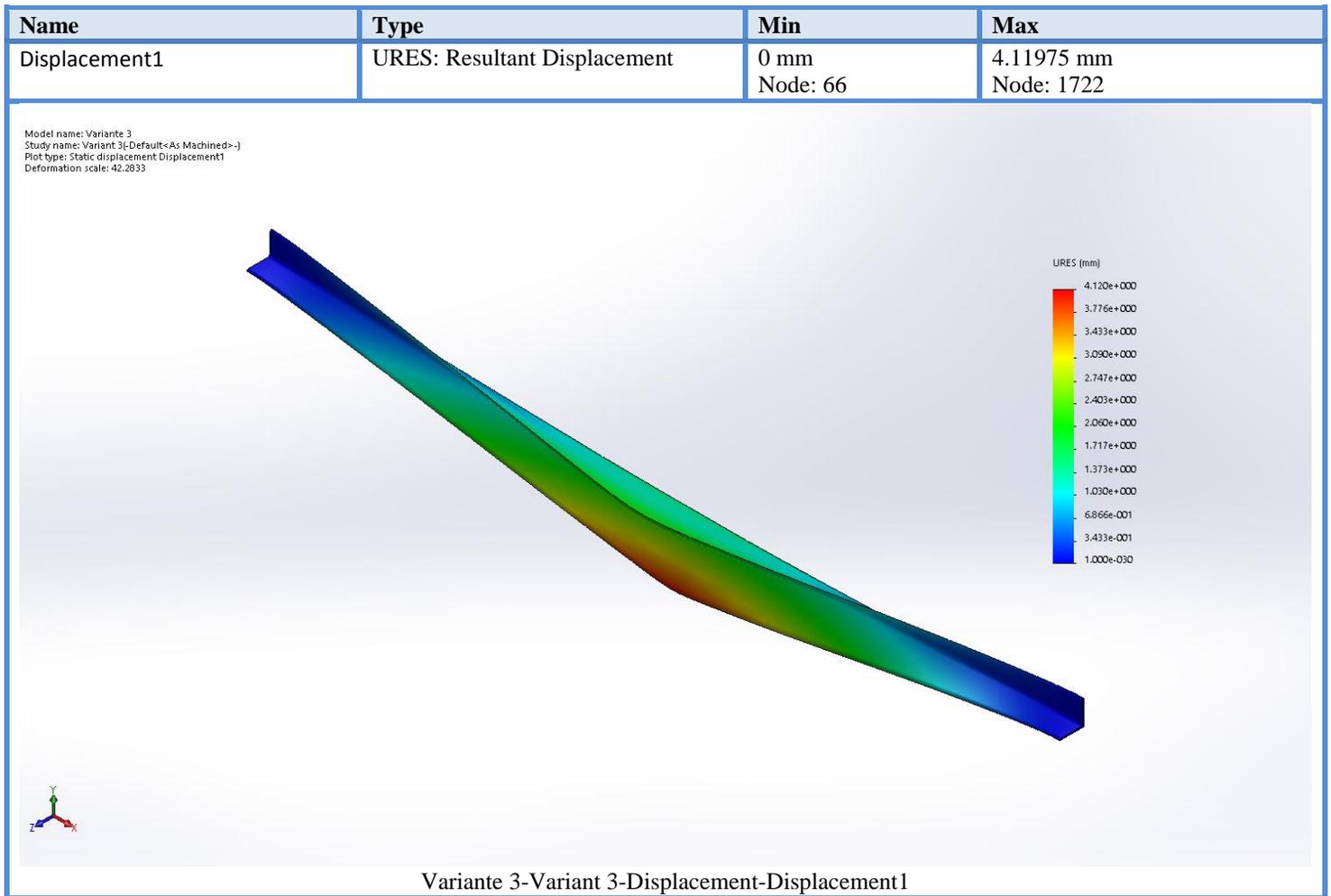


Fig. 3.17: Comportamiento del desplazamiento.

La viga presenta un máximo desplazamiento de 4.11975 mm, lo que provoca que la misma se flechte impidiendo el máximo funcionamiento del sistema, siendo este desplazamiento mayor que el calculado cuando la viga presenta apoyos articulados fijos.

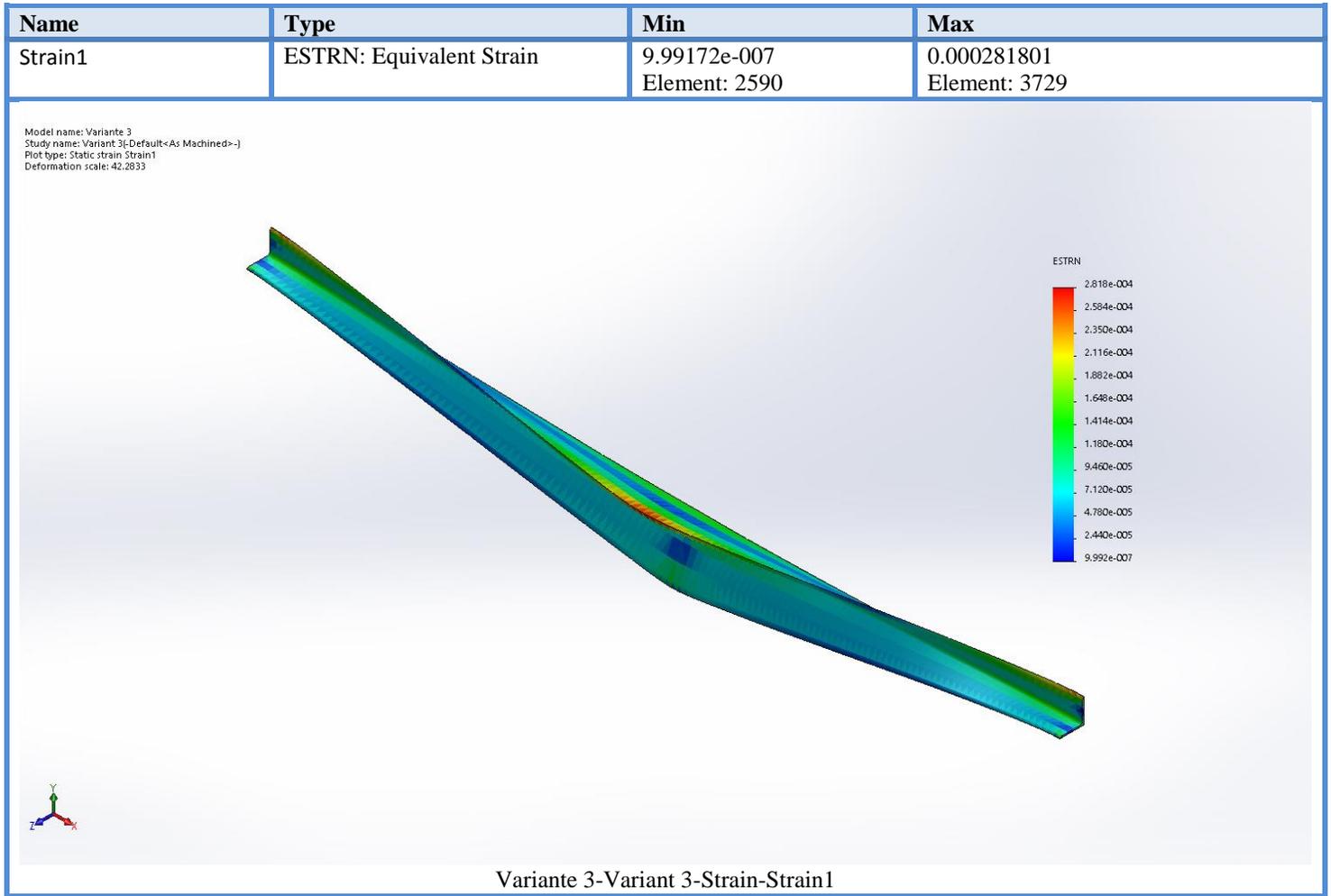


Fig. 3.18: Comportamiento de las deformaciones.

La viga presenta deformaciones equivalentes debido a la carga que soporta, el valor máximo de esta deformación es de $2,81801 \cdot 10^{-4}$, este valor de deformación se toman adimensional porque es en relación a la longitud de la viga, este valor es mayor que el calculado en el otro caso de estudio.

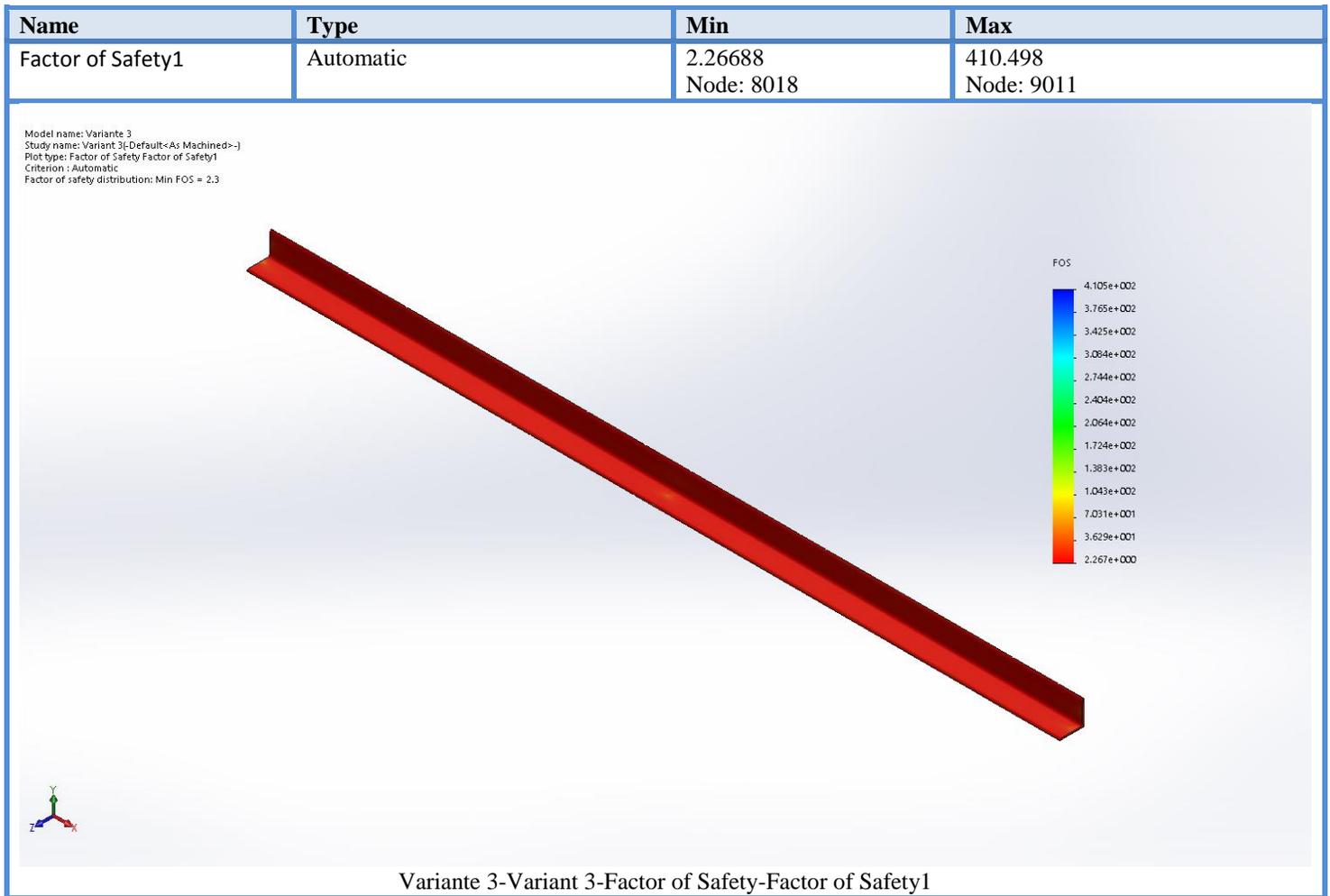


Fig. 3.19: Comportamiento del factor de seguridad.

El programa da como resultado un valor mínimo y máximo de factor de seguridad, el que se tomó para realizar los chequeos de resistencia a la viga se encuentra dentro del rango que muestra el programa.

-Análisis de los Resultados anteriores.

Como se puede apreciar si comparamos los resultados de los cálculos obtenidos en el chequeo de resistencia con los obtenidos por el software se puede plantear que existen grandes diferencias. Esto es provocado debido a que los cálculos del chequeo de resistencia se tiene en cuenta que la carga es puntual, es decir, que la carga interactúa en un solo punto, también existe el redondeo de los resultados obtenidos lo que provoca que los valores no coincidan entre ambos métodos. No ocurriendo así con el software, ya que los cálculos se

hacen por el Método de Elemento Finito, haciendo que la carga se distribuya en toda la superficie de contacto, es decir, que la fuerza interactúa en cada uno de los nodos donde se produce la fractura.

Como se puede apreciar si comparamos los resultados de los cálculos obtenidos en el chequeo de resistencia con los obtenidos por el software se puede plantear que existen grandes diferencias. Esto es provocado debido a

1. Los cálculos utilizados para la construcción de los gráficos del momento flector se fundamentan en el análisis de una viga de sección uniforme y no incluye el efecto de la posición de la fuerza externa, en la sección de la viga; mientras que con la aplicación del software se ha considerado la fuerza aplicada en una sola ala del angular.
2. En los cálculos del chequeo de resistencia se tiene en cuenta que la carga es puntual, es decir, que la carga interactúa en un solo punto, no ocurriendo así con el software donde se ha considerado que la carga se ha distribuido en una superficie de contacto.

La diferencia entre los datos obtenidos mediante los cálculos tradicionales y la aplicación del método de los elementos finitos, haciendo uso del software Solidworks, conllevan a la necesaria validación de los resultados mediante mediciones de los parámetros reales de deformación de la viga aplicando “la extensometría”. Esta acción no pudo ser desarrollada en el presente trabajo debido al tiempo disponible del autor para la culminación del trabajo.

3.2.3 CÁLCULO DE RESISTENCIA DE LA VIGA POR IMPACTO VERTICAL:

Después de haber realizado los cálculos de la viga de forma independiente, teniendo en cuenta apoyos diferentes los cuales dan como resultados que la viga resiste, no cumpliéndose así en la práctica, se aplica otro método de cálculo que es el de impacto vertical.

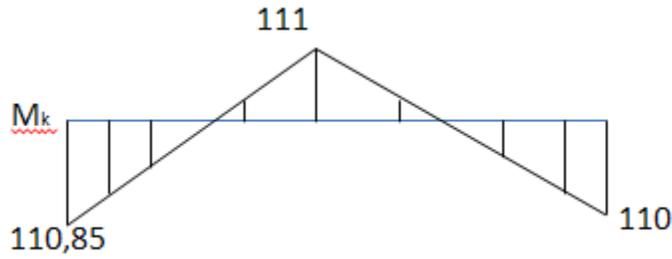


Fig. 3.20: Comportamiento de M_k en la viga.

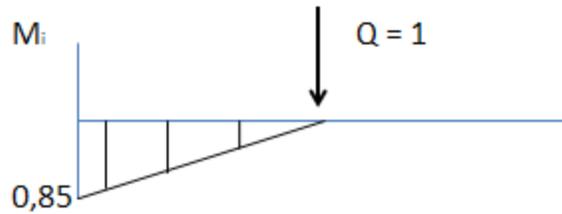


Fig. 3.21: Representación del impacto en la viga teniendo en cuenta un valor unitario.

Se plantea la ecuación para el cálculo del Coeficiente Dinámico (K_d).

$$\bullet \quad K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{v^2}{g \cdot \delta_e}} \quad (3.17)$$

Como este coeficiente depende del Deslizamiento Estático (δ_e) se plantea la ecuación para su obtención.

$$\bullet \quad \delta_e = \frac{1}{E \cdot I_x} [M_k \cdot M_i] \quad (3.18)$$

$$\delta_e = \frac{1}{E \cdot I_x} \left[\begin{array}{c} \triangle \\ \triangle \end{array} * \begin{array}{c} \triangle \\ \triangle \end{array} \right]$$

$$\delta_e = \frac{1}{E \cdot I_x} \left[\frac{h \cdot l}{6} (-2 \cdot S_1 + S_2) \right]$$

$$\delta_e = \frac{1}{E \cdot I_x} \left[\frac{0,85 \cdot 0,85}{6} (-2 \cdot 110 + 111) \right]$$

$$\delta_e = \frac{1}{E \cdot I_x} [-13 \text{ N} \cdot \text{m}^3]$$

$$\delta e = \frac{-13 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}^3}{2 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 0,0791 \cdot 10^6 \text{ mm}^4}$$

$$\delta e = -0,821 \text{ mm} = -0,000821 \text{ m}$$

Sustituyendo $\delta e = 0,000821 \text{ m}$ en la ecuación 3.17 tenemos que:

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{(0,33)^2}{9,81 \cdot (0,000821)}}$$

$$K_d = 4,8$$

Se calcula las Tensiones Estáticas.

$$\bullet \sigma_e = \frac{M_{f \text{ máx}}}{S_x} \quad (3.19)$$

$$\sigma_e = \frac{111 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{mm}}{2,15 \cdot 10^3 \text{ mm}^3}$$

$$\sigma_e = 51,63 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Se prosigue al cálculo de las Tensiones Dinámicas para comprobar si la viga resiste.

$$\bullet \sigma_d = \sigma_e \cdot K_d \leq [\sigma] \quad (3.20)$$

$$\sigma_d = 51,63 \cdot 4,8 \leq 162 \text{ MPa}$$

$$\sigma_d = 247,8 \text{ MPa} > 162 \text{ MPa}$$

Falla

Después de haber realizado diferentes chequeos de resistencia teniendo en cuenta apoyos diferentes, se puede apreciar que la viga cuestionada falla por impacto vertical, lo que impide que la misma cumpla con las funciones para las cuales se diseñó.

CONCLUSIONES PARCIALES:

- 1- Después de realizado el análisis químico en los laboratorios de Planta mecánica de V.C, se concluyó que el material de la viga es un acero C60.
- 2- El cálculo de la tensión máxima en la viga, asumiendo dos apoyos articulados fijos, es de 103 MPa, inferior al admisible del material (162MPa). Lo anterior implica que la viga soporta la carga aplicada.
- 3- El cálculo de la tensión máxima en la viga, asumiendo dos apoyos empotrados, es de 51,63 MPa, inferior al admisible del material. Lo anterior implica que la viga soporta la carga aplicada
- 4- Los valores de tensiones obtenidos mediante la aplicación del método de los elementos finitos, haciendo uso del software Solidworks en el caso del apoyo articulado fijo son menores que los obtenidos mediante métodos tradicionales, no siendo así en el caso del empotramiento que da un valor mayor que los obtenidos por los métodos tradicionales. En el cuerpo del trabajo, el autor expone las causas de dichas diferencias.
- 5- En los cálculos de las Tensiones de Impacto se obtuvieron valores de 234 MPa, superiores a los admisibles, lo cual indica que la viga falla bajo el efecto de las fuerzas de impacto.

Conclusiones y Recomendaciones

CONCLUSIONES:

- 1- La estructura o torre que soporta al molino está compuesta por vigas del tipo angular de alas iguales L 51 X 51 X 3,2, elaboradas con acero C60.
- 2- La carga total aplicada sobre la viga es de 521N y se ha obtenido como resultado de sumar el peso total del sistema unido a la viga que falla (512,18N), con la Fuerza de Inercia máxima que se genera durante el movimiento de traslación del vástago (8,82N), calculada esta última mediante la aplicación de la Segunda ley de Newton (aceleración máxima del vástago de $0,72 \text{ m/s}^2$ y una masa total de 12,25 kg).
- 3- Se aplicaron distintas variantes para el cálculo de las tensiones en la viga cuestionada (métodos no dinámicos), de ellas el máximo valor se obtuvo en el supuesto de apoyos articulados fijos (103 MPa), inferior al admisible del material (162MPa). Lo anterior implica que la viga soporta la carga aplicada.
- 4- En los cálculos de las Tensiones de Impacto se obtuvieron valores de 234 MPa, superiores a los admisibles, lo cual indica que la viga falla bajo el efecto de las fuerzas de impacto.

RECOMENDACIONES:

- 1- Disminuir la carga aplicada al sistema, apoyando la tubería que desciende desde la parte superior de la torre en una base de ladrillo y cemento, preparada a nivel del suelo o algunos centímetros por encima.
- 2- Validar mediante la aplicación de métodos extensométricos, los resultados obtenidos mediante la aplicación de software Solidworks.

Referencias Bibliográficas

1. Puy Iznaga, R, Molinos, Revista Tipos de Molinos, Número 3, año 20, págs. 4 a la 7, Buenos Aire, Argentina, 2013.
2. Baez Perera, S, Aplicaciones de los molinos, Revista Tipo de molinos de viento, Número 4, año 21, págs. 23 a la 27, Buenos Aire, Argentina, 2014.
3. Church Vásquez, L, Tipos de molinos de vientos, Revista Todo sobre molinos, Número 2, año 19, págs. 4 a la 11, Barcelona, España, 2015.
4. Ramírez Fuerte, S, Descripción del molino, Revista Molinos, Número 4, año 21, págs.13 a la 20, Madrid, España, 2013.
5. Figueredo Conrado, M, Fundamentos para el diseño y selección de aerobombas, Revista Las aerobombas modernas, Número 5, año 23, págs. 23 a la 34, Santiago de Chile, Chile, 2014.
6. López, Z, Resultados de las propiedades mecánicas del acero C60, marzo 22, URL: <http://www.matweb.com>
7. Herrando Germán, V, Optimización del diseño de la cimentación para un aerogenerador de gran altura, Revista Grandes aerogeneradores, Número 3, año 22, págs. 15 a la 22, Quito, Ecuador, 2012.
8. Rodríguez Roque, Y, ¿Qué es la energía eólica?, Revista Principios de la Energía Eólica, Número 6, año 22, págs. 1 a la 13, Caracas, Venezuela, 2010.
9. Santos Francisco, V. M, Principio físico y tecnología del Molino de Viento, Revista Manuales y proceso para la implementación de los Molinos de Viento, Número 8, año 26, págs. 1 a la 33, Brasilia, Brasil, 2010.
10. Socarrás Pérez, L, Ángulos estructurales, Revista Aceros Arequipa, Número 3, año 21, págs. 4 a la 5, Lima, Perú, 2013.
11. Feodosiev, V, I, Resistencia de materiales, Editorial Pueblo y Educación, La Habana, Cuba, 1981.

12. Beer, Pierre, Ferdinand, Mecánica de Materiales, Editorial Félix Varela, La Habana, Cuba, 2012.
13. Miroljubov, I, Problemas de Resistencia de Materiales, Editorial MIR, Moscú, URSS, 1971.
14. Levy, Fernández, Gilda, Resistencia de Materiales, Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de La Habana, Cuba, 1983.
15. Pérez Pérez, R, Aceros Galvanizados, Revista Acesco, Número 4, año 22, págs. 1 a la 3, Ciudad de México, México, 2014.
16. Rodríguez, F, Aceros Galvanizados con Galvaplus, Revista Aceros de alta dureza, Número 5, año 25, págs. 18 a la 21, Panamá, Panamá, 2013.
17. Cuellar, D, Lámina galvanizada, Revista Corpacero, Número 3, año 19, págs. 22 a la 25, Ciudad de Guatemala, Guatemala, 2015.
18. Hernández, O, Perfiles estructurales y comerciales, Revista Deacero, Número 4, año 22, págs. 15 a la 17, Bogotá, Colombia, 2014.
19. León, D, Aceros laminado en caliente, Revista Aceros y sus mejoras, Número 3, año 20, págs. 22 a la 29, Montevideo, Uruguay, 2012.
20. Claro, Y, Cuál molino de viento instalar, Revista La energía eólica y sus características, Número 2, año 21, págs. 3 a la 7, Bogotá, Colombia, 2010.
21. Méndez, Y, Mejoras para molinos de vientos, Revista Las aerobombas del futuro, Número 6, año 24, págs. 6 a la 15, Madrid, España, 2015.

Anexos

Anexo I



1- Molino de Viento Americano.

Anexo II



2- Molino que presenta problemas

Anexo III



3- Turbinas de viento.

Anexo IV



4- Molino de poste.

Anexo V



5- Molino de drenaje simple.

Anexo VI



6- Molino de torre.

Anexo VII



7- Molino no instalado sobre el pozo.

Anexo VIII