



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA**

Diseño de un mecanismo triturador para reducir el volumen de transporte de Tereftalato de Polietileno (PET) reciclado - Chiclayo

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Mecánico Electricista

AUTOR:

Acosta Rituay, Edgar Alain (orcid.org/0000-0002-1046-3143)

ASESOR:

Mg. Salazar Mendoza, Anibal Jesus (orcid.org/0000-0003-4412-8789)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Modelamiento y Simulación de Sistemas Electromecánicos

LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

CHICLAYO - PERÚ

2022

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo de investigación a Dios, quien guía mis pasos hacia el éxito profesional con formación de valores, y por haberme brindado la familia que tengo, familia que me apoya constantemente para conseguir mis sueños y hacerlos realidad.

Agradecimiento

Quiero agradecer a la Universidad Cesar Vallejo, por el tiempo que me acogió y me formó como profesional en esta excelente carrera como la Ingeniería Mecánica Eléctrica. Agradecer también a su plana docente y a mis asesores de tesis por enriquecer esta investigación tecnológica.

Índice de contenidos

Carátula	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iii
Índice de contenidos.....	iv
Índice de tablas.....	v
Índice de figuras	vi
Resumen	ix
Abstract.....	x
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Materiales Poliméricos	8
2.1.1. Clasificación de los polímeros	9
2.2. Proceso de trituración	11
2.2.1. Trituradoras	11
III. METODOLOGÍA.....	15
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	15
3.2. Variables y operacionalización	15
3.3. Población, muestra, muestreo, unidad de análisis.....	16
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	16
3.5. Procedimientos	17
3.6. Método de análisis de datos	18
3.7. Aspectos éticos.....	18
IV. RESULTADOS	19
4.1. Cálculo de Oferta disponible de PET en la región de Chiclayo	19
4.2. Dimensionamiento de elementos de máquina para mecanismo triturador.....	24
4.3. Modelado de los elementos de máquina del mecanismo triturador..	64
4.3.1. Sistema de transmisión de dientes rectos	64
4.4. Presupuesto	79
V. DISCUSIÓN	87
VI. CONCLUSIONES.....	91
VII. RECOMENDACIONES	92
REFERENCIAS.....	93
ANEXOS	97

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades del Tereftalato de Polietileno	11
Tabla 2. Generación de PET del 2012 al 2021 para Chiclayo.....	19
Tabla 3. Resumen de generación de PET diario para Chiclayo.....	19
Tabla 4. Generación de PET diario para la ciudad de Chiclayo 2023-2043	22
Tabla 5. Capacidad de trituración por año del mecanismo triturador propuesto ..	23
Tabla 6. Número de máquinas durante el tiempo de vida útil de la trituradora	24
Tabla 7. Factores de sobrecarga sugeridos	50
Tabla 8. Parámetros para diseño de engranajes de dientes rectos	52
Tabla 9. Coeficiente elástico, C_p	54
Tabla 10. Números de calidad AGMA recomendados	54
Tabla 11. Factores de tamaño sugeridos, KS	58
Tabla 12. Factor de confiabilidad, KR	59
Tabla 13. Costo de equipamiento, materiales e insumos para mecanismo de limpieza de residuos sólidos.....	80
Tabla 14. Costo por concepto de instalación, ensamblaje y pruebas.....	81
Tabla 15. Costo total del mecanismo de limpieza de residuos sólidos.....	81

Índice de figuras

Figura 1. Materiales poliméricos.....	8
Figura 2. Designaciones según el tipo de plástico en el reciclaje.....	10
Figura 3. Triturador de martillos marca ASEA	12
Figura 4. Trituradora de cuchillas	12
Figura 5. Gráfico de generación de PET diario y ecuación lineal para determinar R^2	21
Figura 6. Bosquejo del mecanismo triturador y sus elementos de máquina	25
Figura 7. Tipo de cuchilla trituradora más eficiente	25
Figura 8. Modelado de cuchilla trituradora para mecanismo triturador.....	26
Figura 9. Esfuerzos de Von Mises obtenidos del análisis estático	28
Figura 10. Desplazamientos estáticos obtenidos del análisis estático (Escala de deformación: 1381.17)	29
Figura 11. Desplazamientos estáticos obtenidos del análisis estático (Escala de deformación: 1)	30
Figura 12. Factores de seguridad obtenidos del análisis estático	31
Figura 13. Modelado de eje portacuchillas, cuchillas y separadores de cuchillas	34
Figura 14. Esfuerzos de Von Mises obtenidos en eje portacuchillas.....	35
Figura 15. Desplazamientos obtenidos en eje portacuchillas (Escala de deformación=2881.51)	36
Figura 16. Desplazamientos obtenidos en eje portacuchillas (Escala de deformación=1)	37
Figura 17. Factores de seguridad obtenidos en eje portacuchillas.....	38
Figura 18. Fuerzas resultantes en los apoyos del eje portacuchillas	39
Figura 19. Modelado de la tolva de alimentación	42
Figura 20. Esfuerzos de Von Mises obtenidos en la Tolva de alimentación.....	43
Figura 21. Desplazamientos obtenidos en la Tolva de alimentación (Escala de	

deformación: 162.719)	44
Figura 22. Desplazamientos obtenidos en la Tolva de alimentación (Escala de deformación: 1)	45
Figura 23. Factores de seguridad obtenidos en la Tolva de alimentación.....	46
Figura 24. Sección de PET que tritura la cuchilla.....	49
Figura 25. Gráfico para determinar el paso diametral	51
Figura 26. Factor dinámico, K_v	55
Figura 27. Factor J de geometría	56
Figura 28. Factor de geometría I para piñones rectos externos.....	56
Figura 29. Factor de proporción, C_{pf}	57
Figura 30. Factor de alineamiento del engranado,	57
Figura 31. Factor de espesor de borde, K_B	58
Figura 32. Factor de resistencia flexionante por ciclos de esfuerzo, Y_N	60
Figura 33. Factor de resistencia a la picadura por ciclos de esfuerzo, Z_N	61
Figura 34. Número de esfuerzo de contacto admisible, S_{ac}	63
Figura 35. Propiedades del acero AISI 4140.....	63
Figura 36. Modelado de piñón de 17 dientes	65
Figura 37. Modelado de engrane de 38 dientes	66
Figura 38. Vista isométrica de la base para mecanismo triturador.....	68
Figura 39. Vistas respectivas de la base para mecanismo triturador	69
Figura 40. Esfuerzos de Von Mises obtenidos del análisis estático en base	70
Figura 41. Deformaciones obtenidas del análisis para la base (Escala de deformación=518.831)	71
Figura 42. Deformaciones obtenidas del análisis para la base (Escala de deformación=1)	72
Figura 43. Factores de seguridad obtenidos del análisis estático para la base ...	73

Figura 44. Vistas respectivas del ensamblaje del mecanismo triturador	76
Figura 45. Vistas respectivas del ensamblaje del mecanismo triturador con transparencia.....	77
Figura 46. Vista isométrica del ensamblaje del mecanismo triturador.....	78

Resumen

En la actual investigación se propuso como objetivo general diseñar un mecanismo triturador de PET para reducir el volumen de transporte de PET en la región de Chiclayo. El tipo de investigación empleada fue aplicada, con un diseño de investigación no experimental. De los resultados, se obtuvo que la oferta de PET disponible en la ciudad de Chiclayo tiene una variación debido a que cada año se tuvo un aumento de la generación de PET, es decir, que para el año 2023 se generará 3213 kg/día de PET, para el año 2024 de 3429 kg/día, y así sucesivamente, hasta que en el año 2043 será de 7551 kg/día, esto, considerando que el mecanismo triturador tiene una vida útil de 20 años. Los elementos de máquina que conforman el mecanismo triturador son las cuchillas trituradoras de 180 mm de diámetro y 30 mm de espesor, en acero AISI 1045 estirado en frío, de igual modo, los separadores de las cuchillas, fabricados con el mismo acero, de 120 mm de diámetro y 30 mm de espesor, ejes portacuchillas con una sección hexagonal que forman un diámetro de 27 mm de extremo a extremo fabricado con el mismo material, piñón de 17 dientes y engranajes de 38 dientes fabricados en acero AISI 4140 grado 2 de HB 388, para la caja reductora de velocidad, base para el mecanismo triturador fabricado en acero A500 con tubo cuadrado de 40 mm x 40 mm x 3 mm de espesor y sus protectores de seguridad para partes expuestas. Del modelado en SolidWorks se pudo determinar que, al realizar un análisis estático para los elementos del mecanismo triturador, logran cumplir con los factores de seguridad adecuados para un buen funcionamiento del mecanismo propuesto. El presupuesto para poder fabricar el mecanismo triturador fue de S/. 25 952.92, incluyendo equipamiento, insumos y materiales además de los conceptos de instalación, montaje y pruebas.

Palabras clave: Diseño mecánico, mecanismo triturador, Tereftalato de Polietileno.

Abstract

In the current investigation, the general objective was to design a PET crushing mechanism to reduce the volume of PET transport in the Chiclayo region. The type of research used was applied, with a non-experimental research design. From the results, it was obtained that the supply of PET available in the city of Chiclayo has a variation due to the fact that each year there was an increase in the generation of PET, that is, that by the year 2023 3213 kg/day of PET will be generated. PET, for the year 2024 of 3429 kg/day, and so on, until in the year 2043 it will be 7551 kg/day, this, considering that the grinding mechanism has a useful life of 20 years. The machine elements that make up the shredding mechanism are the shredding blades with a diameter of 180 mm and a thickness of 30 mm, in AISI 1045 cold drawn steel, in the same way, the blade separators, made with the same steel, of 120 mm in diameter and 30 mm thick, blade-holder shafts with a hexagonal section that form a diameter of 27 mm from end to end made of the same material, 17-tooth pinion and 38-tooth gears made of AISI 4140 grade 2 HB steel 388, for the speed reduction box, base for the grinding mechanism made of A500 steel with a 40 mm x 40 mm x 3 mm thick square tube and its safety protectors for exposed parts. From the modeling in SolidWorks, it was possible to determine that, when performing a static analysis for the elements of the crusher mechanism, they manage to comply with the adequate safety factors for a good functioning of the proposed mechanism. The budget to be able to manufacture the grinding mechanism was S/. 25 952.92, including equipment, supplies and materials in addition to the concepts of installation, assembly and testing.

Keywords: Mechanical design, grinding mechanism, Polyethylene Terephthalate.

I. INTRODUCCIÓN

En el ámbito internacional, cada día se vuelve más popular una frase que dice “lloverá plástico del cielo”, y cabe precisar que no es de sorprenderse si se considera que se producen aproximadamente más de 380000000 de toneladas de plástico anualmente (equivalente a la masa de 1000000 de aeronaves Boeing 747 completamente cargados al año), donde solo las $\frac{3}{4}$ partes del total se botan como desecho contaminante. El plástico está formado por polímeros sintéticos simples el mismo que está conformado por moléculas pequeñas llamados monómeros que se encuentran unidos en una formación reiterativa. Es un elemento realmente versátil, con excelentes características como anticorrosivos, peso ligero, flexibilidad, durabilidad y transparencia. Los más empleados son el Polietileno (PE), Tereftalato de Polietileno (PET), el Poliestireno (PS), Propileno (PP) y finalmente el Cloruro de Polivinilo (PVC). (Buteler, 2019)

En el Perú, se puede decir que por cada metro cuadrado de costa se puede encontrar más de 20 productos de residuos plásticos y miles de micro partículas plásticas, añadido a esto el aumento de un desecho nuevo contaminante, las mascarillas que actualmente se usan como un equipo de protección personal empleados en la pandemia ocasionada por la COVID-19 (Molina Castro et al., 2021).

Cabe mencionar que la región de Chiclayo no se salva de dicho problema, por lo que es necesario brindar una solución óptima para reducir la contaminación por PET o plásticos, por eso se plantea la presente investigación para poder reducir su volumen al momento de ser transportado a cargo de una empresa

recicladora y adicionalmente se reducirá la contaminación ya que será empleado para reciclaje.

Por lo que es importante la administración de residuos sólidos para reducir el impacto que originan donde se incluye actividades como reducción, reutilización, recolección, clasificación, reciclaje, transporte, tratamiento y su disposición final, además de reducir su volumen al querer trasladarlo (Pisani Junior et al., 2018).

Por ello es importante reducir el volumen de transporte con el fin de optimizar el reciclado al transportar más cantidad en un volumen más reducido.

A partir de lo escrito párrafos anteriores se originó la formulación del problema para la investigación mediante la interrogante: ¿en cuánto se podrá reducir el volumen de transporte del PET mediante una máquina trituradora? y para la formulación de los problemas específicos, se plantearon las siguientes interrogantes: ¿Cuál es la oferta de PET disponible en la región de Chiclayo?, ¿Cuáles son las medidas y dimensiones de los elementos de máquina necesarios para el diseño de un mecanismo triturador de PET?, ¿Qué programa se debe emplear para elaborar el modelado de los elementos de máquina para el mecanismo triturador, además de poder presentar el ensamblaje? y ¿Cuál sería el presupuesto que conlleva el diseño del mecanismo triturador de PET?

El desarrollo del trabajo de investigación se justifica porque se pudo determinar el poder transportar la mayor cantidad de PET en un volumen más reducido lo que implica una reducción en los costos de transporte. Además, permitió el incremento en valor por tonelada de PET, debido al proceso de triturado.

Se justifica en el ámbito social ya que permitió reducir costos en concepto de transporte, ya que, al reducirse su volumen, pero mantener la masa, será transportado más cantidad de PET, lo que generó además un aumento en la rentabilidad de la empresa recicladora.

Para poder dar solución al problema se planteó el siguiente objetivo general:

Diseñar un mecanismo triturador de PET para reducir el volumen de transporte de PET en la región de Chiclayo, siendo los Objetivos Específicos

- a. Calcular la oferta de PET disponible en la región de Chiclayo.
- b. Dimensionar los elementos de máquina necesarios para el diseño del mecanismo triturador de PET.
- c. Realizar el modelado de los elementos de máquina para el mecanismo triturador utilizando el software SolidWorks incluyendo el ensamblaje.
- d. Elaborar el presupuesto para el diseño del mecanismo triturador de PET.

Asimismo, se formuló la hipótesis: mediante el diseño de una máquina trituradora se podrá reducir el volumen de transporte de PET en la región de Chiclayo.

II. MARCO TEÓRICO

Se hizo la revisión de literatura en cuanto a investigaciones realizadas para la reutilización del plástico y los principios de funcionamiento de los dispositivos electromecánico de la máquina, entre las cuales se tiene:

Wong et al. (2022) en su artículo de investigación de una máquina trituradora para reciclaje de plástico plantearon como objetivo revisar las diferentes geometrías y orientaciones de las cuchillas donde estas tienen un efecto de forma directa en la eficiencia de la trituradora, además identificaron los vacíos de investigación relacionados con las máquinas trituradoras de residuos plásticos. Determinaron que las cuchillas y el eje son los elementos críticos de la máquina trituradora que afectan su eficiencia. También lograron descubrir que la forma, además de las orientaciones, de las cuchillas que fueron instaladas en los ejes simples o dobles, indican de manera directa la eficiencia del proceso de trituración.

Según Dollera et al. (2019) en su artículo respecto al desarrollo de la trituradora de plástico XU como medio rentable de minimizar el volumen de residuos plásticos de tereftalato de polietileno, diseñaron una trituradora de plástico que sea rentable para minimizar el volumen de residuos plásticos de PET. Se enfocaron en el desarrollo de una trituradora de plástico de PET para la Universidad Xavier con el fin de reducir el costo de transporte de las botellas de plástico usadas hasta el vertedero designado a unos 9 km. El desarrollo de esta trituradora de plástico de 2 hp sirvió para reducir el volumen de materiales plásticos en la Planta de Recuperación de Materiales del municipio de Alubijid, Misamis Oriental. La trituradora de plástico XU obtuvo una reducción promedio

del volumen de plástico de aproximadamente 82,41%. Con esta reducción de volumen, el número de viajes del camión recolector de basura también se reduce en un 82,41%, lo que ahorra costos de entrega y mano de obra. El costo del consumo de energía de la trituradora de plástico XU es de solo PhP36.52 por hora.

De acuerdo con Ravi (2018) en su artículo sobre la utilización de cuchillas trituradoras mejoradas y reciclaje de residuos de plástico y llantas de caucho, elaborando una máquina que mejora el desempeño de forma más eficiente para la empresa y haciendo que el proceso de trituración de basura plástica tenga un mayor rendimiento. Para lo cual se optimizó la cuchilla trituradora para una mejor trituración de los desechos plásticos en elementos más finos. Reduciendo la mano de obra y además de no requerir mano de obra calificada en la industria. En el proceso de reciclaje, los residuos plásticos requieren poca energía, debido a la forma compacta de los mismos. Logró demostrar que se reduce el tiempo de proceso en la industria, donde el presupuesto es realmente bajo, indicando que el proyecto es menos costoso y, por ende, es rentable y confiable.

Para Reddy & Raju (2018) en su artículo de investigación sobre el diseño y desarrollo de mini máquina trituradora de plástico, donde plantearon como objetivo el investigar, diseñar y desarrollar una mini máquina trituradora de plástico que sea rentable, para luego probar y verificar su funcionamiento. Para implementar este concepto, se implementó una máquina trituradora de plástico que consta de algunos componentes mecánicos y eléctricos como el marco, la tolva, el motor eléctrico, el sistema de transmisión por correa en V y la

configuración de la trituradora. Esta máquina se utiliza para cortar el plástico en pedazos pequeños, que son escamas de forma irregular que se pueden procesar más. El reciclaje recupera la materia prima, lo que ayuda a fabricar nuevos productos de plástico. Las piezas de plástico reciclado se alimentan a la máquina de extrusión donde pueden formar un alambre como el plástico llamado filamento y luego se utilizan en la máquina de impresión 3D.

Según Khoa Nguyen et al. (2021) en su artículo sobre la caracterización de los parámetros geométricos de botellas de plástico empleando un método de optimización de dos pasos, plantearon como objetivo realizar una investigación numérica y experimental de los parámetros geométricos de la cuchilla para trituradora de botellas de plástico basada en el método Taguchi en combinación con un método de superficie de respuesta (RSM). La trituración, en la que los residuos plásticos se Trituran en pequeños trozos, listos para su transporte y procesamiento posterior, es un paso crucial en el reciclaje de plástico. Aunque se realizaron muchos estudios sobre trituradoras de plástico, todavía era necesario realizar más investigaciones sobre la optimización de las cuchillas trituradoras. Por lo tanto, se llevó a cabo un análisis numérico para estudiar las influencias de los parámetros geométricos relevantes. Posteriormente, se utilizó un proceso de optimización de dos pasos que combinaba el método de Taguchi y el RSM para definir los parámetros óptimos.

Es por ello, que Hidalgo Aguilera et al. (2017) diseñaron e implementaron una máquina recicladora por corte para las botellas de plástico, para obtener hilos y cintas empleando un proceso de corte continuo rotacional. Dicha máquina puede procesar botellas de hasta 3 litros de capacidad.

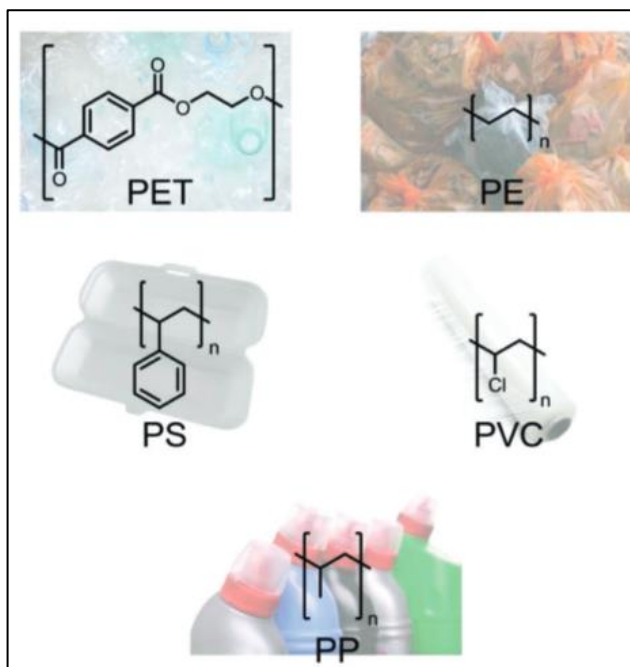
Además, Naranjo Vargas et al. (2021) también propusieron el diseño y fabricación de un prototipo para una máquina recicladora de plástico PET, donde emplearon el corte por cizallamiento, mediante la rotación de cuchillas a 10 rpm.

Adicionalmente, Faiyyaj et al. (2017) elaboraron el diseño y desarrollo de una máquina trituradora de plástico para poder ser empleado en el sector doméstico, industrial, etcétera; con el objetivo de reducir el uso de plástico y ser reutilizado mediante el corte y triturado del mismo en pequeños trozos para facilitar la administración de residuos.

Adicionalmente, en el ámbito nacional se tiene la investigación realizada por Alvarado Díaz et al. (2021), quienes diseñaron una máquina trituradora de plástico para obtener desechos de forma automatizada y además de ser de utilidad para disminuir la contaminación plástica, emplearon el software SolidWorks para el diseño mecánico y una placa programable Arduino UNO que permitió que la máquina logre operar de forma automatizada. Mediante el diseño de la máquina trituradora de residuos plásticos se seleccionó el plástico por color y tipo de composición, ya sea Polietileno Tereftalato (PET), Polietileno de Alta Densidad (HDPE), Polietileno de Baja Densidad (LDPE), Policloruro Vinílico (PVC) entre otros (Mezcla de plástico), luego pasó por el proceso de trituración para convertirse en pequeños desechos de plástico, que podrían convertirse en filamentos para impresoras 3D.

Gran parte del enfoque en los polímeros sostenibles se ha centrado en el desarrollo de nuevas materias primas para la industria del plástico, aunque muchos de estos nuevos polímeros tienen dificultades para cumplir con los desafiantes requisitos de bajo costo, producción a escala y propiedades excepcionales. Un modelo de economía circular sugiere un uso juicioso de los recursos que tenemos, incluidas las materias primas del petróleo, ya que promueve la revalorización de los plásticos que ya están en circulación. Si bien se deben promover las economías de reducción y reutilización, y las materias primas de fuentes biológicas que evitan afectar nuestra industria agrícola seguirán creciendo, el reciclaje de plásticos es un eje para reducir los desechos plásticos. Con cero vertidos de desechos recolectados. como objetivo para la circularidad total, el reciclaje debe mejorar (Schyns & Shaver, 2021).

Figura 1. *Materiales poliméricos*



Fuente: (Schyns & Shaver, 2021).

Los termoplásticos comúnmente utilizados incluyen los siguientes: Polietileno (PE), Poliamidas (PA), Polipropileno (PP), Policarbonato (PC), Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), Alcohol Etilvinílico (EVOH), Estireno Acrilonitrilo (SAN), Poliéter Éter cetona (PEEK), Polioximetileno (POM), Poliestireno expandido (espumado) EPS, Polisulfona (PSU), Poliestireno (PS), Elastómeros termoplásticos (TPE), Tereftalato de polietileno (PET), Metacrilato de polimetilo (PMMA), Cloruro de polivinilo (PVC), Fluoropolímeros. Los termoestables comúnmente conocidos son los siguientes: resinas de fenol formaldehído, polisiloxanos (siliconas), resinas de viniléster, poliésteres, resinas de urea-formaldehído, poliuretanos (PUR), poliimidas, resinas de melamina, resinas epoxi, resinas acrílicas. El mayor porcentaje de los plásticos mencionados utilizados en 2018 fue el Polipropileno y el Polietileno (Huemer, 2019).

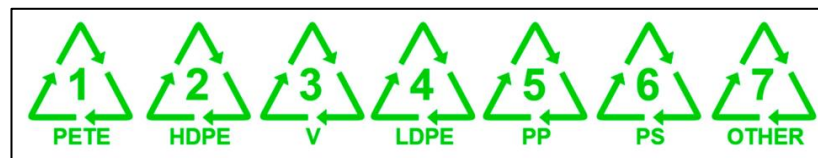
Debido a sus propiedades, los polímeros se dividieron en siete grupos según los tipos de residuos reciclables, que se marcaron especialmente para facilitar su identificación durante la clasificación y recogida de residuos Figura 2. Según los datos de Plastics Europe, se recogieron 29,1 millones de toneladas de materiales poliméricos contaminados y se observa una nueva tendencia al alza (Huemer, 2019).

La forma dominante de gestión de residuos fue la valorización energética (42,6 %), seguida del reciclaje (32,5 %) y el vertido (24,9 %) (Crippa y otros, 2019). Tanto la valorización energética como el reciclado muestran una tendencia al alza cada año, mientras que se observa un descenso en el número de residuos sometidos a vertedero (Huemer, 2019).

Sin embargo, es evidente el gran desafío que representa la gestión de la contaminación durante el uso de materiales poliméricos, lo que se expresa, entre otros, en la parte aún significativa del almacenamiento de residuos, así como en una gran parte de la recuperación de energía en el balance total de métodos de gestión de EoL de materiales poliméricos.

Debido a sus propiedades, los polímeros se dividieron en siete grupos según los tipos de residuos reciclables, que se marcaron especialmente para facilitar su identificación durante la clasificación y recogida de residuos.

Figura 2. Designaciones según el tipo de plástico en el reciclaje



Fuente: (Huemer, 2019).

Tereftalato de Polietileno Conocido como PET, el cual se creó en la década de los años 40, aunque, no fue hasta los años 70 donde se empezó a desarrollar envases de PET, ya que sus propiedades y características eran adecuadas para su fabricación de forma masiva para su venta como envase de diferentes productos. Pero no se consideró que su degradación es de aproximadamente 100 a 1000 años, generando un gran dolor de cabeza, debido al impacto ambiental negativo que se genera al desecharse (Vela et al, 2018).

El PET se puede encontrar como un polímero amorfo (transparente) pero también es encontrado en forma semicristalino. Se dice que tiene propiedades notables ante la humedad y el agua, es por esa razón que se emplean botellas fabricadas de PET para diferentes propósitos en el sector alimenticio. Al ser encontrado en la naturaleza tiene aspecto de resina semicristalina incolora. Dependiendo de su procesamiento, se tendrá PET semirrígido o rígido pero que es realmente liviano. (Zargar & Singla, 2020).

Tabla 1. *Propiedades del Tereftalato de Polietileno*

Símbolo	PET
Densidad	1,34 – 1,39 g/cm ³
Resistencia a la tensión	59-72 MPa
Temperatura de fusión	244 – 254 °C

Fuente: (Zargar & Singla, 2020).

Proceso de trituración. Es uno de los procesos más empleados a la hora de reciclar plástico o cualquier otro material similar. El proceso de trituración permite reducir el tamaño del material de forma considerable para su posterior reciclaje y uso (Sandoya Lara & Macias Coello, 2021)

Trituradoras Están conformadas por elementos que al ensamblarse tanto las piezas estáticas como las móviles, sistema de accionamiento o motor, sistema eléctrico, circuito de potencia y mando, tienen como finalidad obtener pedazos de un volumen más reducido del material (Monteza Leiva, 2019).

Existen varios tipos para las máquinas trituradoras, los cuales son: Trituradora de martillos, los cuales poseen una gran resistencia para aplastar y moler un sinfín de materiales. Este tipo de trituradora emplea una serie de martillos que pueden ser fijos u oscilobatientes, quienes son los encargados

de golpear los residuos mientras van girando hasta triturarlos y reducir su tamaño hasta hacerlo granos. (ItalesMEX, 2018).

Figura 3. Tritrador de martillos marca ASEA



Fuente: (Gil P & Espinosa B, 2018)

Trituradora de cuchillas Este tipo de trituradora emplean cuchillas y son perfectas para la trituración de materiales semiduros y blandos, fibrosos, quebradizos, sensibles y resistentes a la temperatura, pudiendo ser plásticos y además se pueden emplear para poder elaborar mezclas heterogéneas (Fritsch GmbH, 2022).

Figura 4. Trituradora de cuchillas



Fuente: (Jadhav et al., 2018)

La potencia que se requiere para el accionamiento de un eje de una máquina, está en función a los parámetros del torque mecánico y de la velocidad angular con el cual éste gira. El torque mecánico es la acción de la fuerza por el radio de giro del eje, mientras la velocidad angular, es la rapidez con el cual varía el ángulo de giro del eje en función a la variación del tiempo.

Se expresa la potencia mecánica:

$$Pm = Tm * Wa$$

Dónde:

Pm: Potencia mecánica, en Watt.

Tm: Torque mecánico, en N.m.

Wa: Velocidad angular, en Rad/s.

El valor del torque mecánico, se expresa:

$$Tm = Ft * R$$

Dónde:

Tm: Torque mecánico, en N.m.

Ft: Fuerza tangencial, en N

R: Radio de giro, en m.

Así mismo el valor de la velocidad angular del eje del mecanismo, se expresa en término al número de revoluciones de giro del motor por cada minuto, es decir:

$$W_a = \frac{2 \cdot \pi \cdot RPM}{60}$$

Dónde:

Wa: Velocidad Angular, en Rad/s.

RPM: Velocidad de giro, en número de vueltas por minuto.

Luego, si se reemplaza la ecuación de la velocidad angular y de la fuerza tangencial en la ecuación de la potencia mecánica, se tiene:

$$P_m = \frac{F_t * R * \pi * RPM}{30}$$

Este valor de potencia mecánica Pm, varía en función a la Fuerza tangencial y a la velocidad de giro; la variación de la fuerza tangencial, se da porque se requiere mayor o menor fuerza en función al espesor del material que ingresa a la máquina a triturarse (Tereftalato de Polietileno) y la velocidad de giro varía en función a la cantidad de material que ingresa en un periodo de tiempo.

La velocidad de giro del motor eléctrico que acciona al eje de la máquina trituradora, se varía en función a la frecuencia eléctrica ya sea de la onda de tensión o de corriente que se suministra al inducido del motor; la variación de la velocidad de giro, se expresa:

$$RPM = \frac{60.F}{NPP}$$

Dónde:

RPM: Velocidad en número de vueltas por minuto.

F: Frecuencia eléctrica, en Hertz.

NPP: Número de par de polos del motor eléctrico.

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada, porque es aquella que permite emplear los conceptos y teorías del diseño mecánico para poder diseñar el mecanismo triturador con el fin de reducir el volumen de PET.

Diseño de investigación

El diseño de investigación es **No Experimental Longitudinal**, porque no habrá manipulación en las variables. Los datos se obtendrán según se desarrollen en su contexto real.

3.2. Variables y operacionalización

Variable 1: Diseño de mecanismo triturador

Máquina conformada por elementos de máquina que tiene la capacidad de triturar el plástico PET para reducirlo a partículas mínimas para su reciclado (Baño Marti, 2019).

Variable 2: Reducir volumen de transporte de PET reciclado

Proceso que sirve para la recuperación de residuos plásticos PET para su reutilización como materia prima para elaborar nuevos productos o también

como productos químicos o combustibles (Twenergy, 2021).

El volumen de PET es reducido mediante el proceso de trituración, pudiendo ser transportado de forma más eficiente (Dollera et al., 2019).

3.3. Población, muestra, muestreo, unidad de análisis

Población:

La población serán las botellas de plástico de Tereftalato de Polietileno o PET en la región de Chiclayo.

Muestra:

Las botellas de PET que recoge una empresa recicladora de la ciudad de Chiclayo.

Muestreo:

Se aplica el muestreo no probabilístico, dado que se escoge la muestra con intención de acuerdo a la problemática planteada.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Técnicas de recolección de datos

Observación

Esta técnica permitirá visualizar diferentes mecanismos de trituradores para plásticos o similares, sea tomadas digitalmente por fotos o en caso de recurrir a alguna empresa o entidad que posea una máquina trituradora en su inventario, con el objetivo de poder ver y comprender su funcionamiento, las características como el espacio que ocupa, la potencia que necesita, la altura, entre otros parámetros que luego servirán para el modelado del mecanismo triturador.

Revisión bibliográfica

Este tipo de técnica permitirá investigar sobre las características de los elementos de máquinas para un mecanismo triturador, sobre cómo realizar el diseño mecánico partiendo desde la potencia del motor hasta las dimensiones de la tolva de alimentación de acuerdo a la capacidad de la máquina, para lograrlo se hará una revisión y análisis en revistas indexadas,

las cuales se pueden encontrar en Scopus, ScienceDirect, ProQuest y Web of Science, considerando que éstas sean de alto impacto.

Análisis documental

Para el desarrollo de este tipo de técnica, se buscará información en libros actualizados con alto contenido respecto al tema investigado, además de artículos de revistas, manuales, fichas técnicas, es decir, de fuentes secundarias de información.

Instrumentos de recolección de datos

Ficha de apuntes

Este instrumento de recolección de datos permitirá obtener datos importantes para el desarrollo de la máquina trituradora de PET con el fin de determinar qué tanto se podrá reducir el volumen de transporte de dicho material. Los mismos que no necesitan ser validados ya que los datos fueron recopilados en el pasado por otro investigador, en este caso, SIGERSOL o ente perteneciente al Gobierno Regional de Lambayeque, lo cual da validez a dichos datos. Para obtener la oferta disponible de PET se recurrirá a la información brindada por el Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos (SIGERSOL).

3.5. Procedimientos

Los procedimientos que se emplearán se detallan a continuación:

- a) En primer lugar, se determinará la oferta de PET disponible en la localidad de estudio, empleando los instrumentos de recolección de datos apropiados, como el registro de datos elaborado por SIGERSOL.
- b) Mediante entrevistas realizadas a los trabajadores se tomará datos que permitan establecer los parámetros del diseño del mecanismo triturador (tamaño de cuchilla, volumen de proceso, tamaño de la máquina, etc.)

- c) Con la información de los parámetros se procede a dimensionar los diferentes elementos de máquinas de la trituradora, empleando software MathCAD Prime 7, donde introducirán todos los datos necesarios para el diseño. Con los datos obtenidos de los cálculos se alimentará al software SolidWorks para realizar el modelado de los elementos principales del diseño con la finalidad de obtener los esfuerzos a los que está sometido.
- d) Finalmente, empleando el software Microsoft Excel, se elaborará una tabla donde se incluirán los costos de cada elemento de máquina además del ensamblaje, mano de obra y puesta en servicio de ser el caso de querer implementar el mecanismo triturador.

3.6. Método de análisis de datos

Los datos obtenidos para el presente proyecto serán procesados de manera manual y a la vez utilizando programas de computadora como el MathCAD Prime 7 para determinar todos los parámetros necesarios, así software de diseño CAD/CAE como SolidWorks para el modelado de las piezas mecánicas del mecanismo triturador, el software Microsoft Excel para elaborar el presupuesto que conlleva el poder implementar la propuesta de diseño del mecanismo triturador.

3.7. Aspectos éticos

Los informes o investigaciones empleadas para el desarrollo del presente proyecto, no se alteraron, es decir, se tuvo en cuenta las normas para referenciar a los autores y material bibliográfico consultado. Además, considerando la guía del asesor para que el proyecto sea lo más exacto posible a la realidad y evitando cualquier tipo de plagio o copia, buscando la originalidad del mismo.

IV. RESULTADOS

4.1. Cálculo de Oferta disponible de PET en la región de Chiclayo

Para poder determinar la oferta disponible de PET, se recopiló información de la página web de SIGERSOL (Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos), sobre la cantidad de generación de PET para la ciudad de Chiclayo desde el año 2019 al 2021. Cabe precisar que la información sobre la generación de residuos sólidos de los años 2012 al 2015 se aprecia en el Anexo 2. Luego en la Tabla 2 se resume la generación de PET durante los años 2012 al 2021. Entonces se tiene que:

Tabla 2. Generación de PET del 2012 al 2021 para Chiclayo

Año	PET (%)	Cantidad de residuos sólidos por día (t/día)	Cantidad de PET anual (t/año)	Generación de PET diario (t/día)
2012	4.35	32.03	508.556	1.393
2013	2.35	32.50	278.769	0.764
2014	2.35	36.00	308.790	0.846
2015	4.35	32.03	508.556	1.393
2016				
2017				
2018				
2019			975.64	2.673
2020			891.36	2.442
2021			1014.59	2.780

Fuente: (SIGERSOL, 2012, 2013, 2014, 2015, 2019, 2020, 2021)

Con la información de la tabla anterior, se empleó el método de regresión lineal para determinar una ecuación que se ajuste a los datos de generación de PET diario en toneladas por año. Entonces, la Tabla 3 muestra dicha información para emplear el método de regresión lineal y luego determinar el valor de R^2 con el software Microsoft Excel 2019.

Tabla 3. Resumen de generación de PET diario para Chiclayo

Año	Generación de PET diario (t/día)
2012	1.393
2013	0.764
2014	0.846
2015	1.393
2016	
2017	
2018	
2019	2.673
2020	2.442
2021	2.780

Fuente: SIGERSOL (2012, 2013, 2014, 2015, 2019, 2020, 2021)

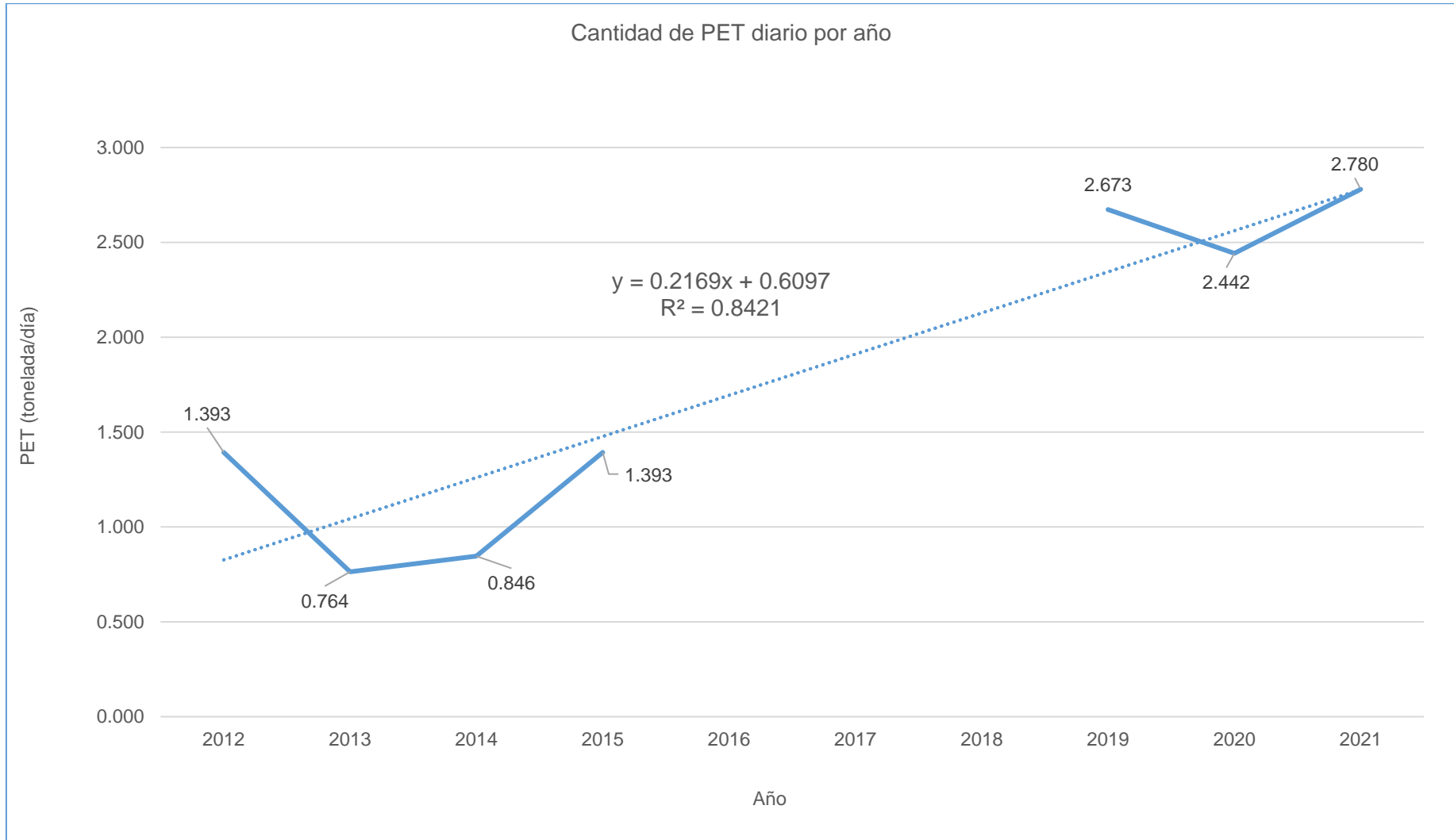
Luego, en la Figura 5 se puede verificar el gráfico de los datos de la Tabla 3 para determinar la ecuación lineal que se ajusta a los valores de generación de PET diario en toneladas diarias. El software Microsoft Excel 2019 calculó la siguiente ecuación:

$$y = 0.2169x + 0.6097$$

Donde “y” representa la generación de PET diario en toneladas diarias y “x” representa el año, pero cabe precisar que el programa toma el año 2012 como valor de 1 y así sucesivamente para el resto de datos. El valor de R² de la ecuación lineal es de 0.8421, un valor bastante próximo a la unidad, indicando que dicha ecuación se aproxima en un 84.21% a los datos reales, es decir, que en un 84.21% la variable “y” depende de la variable “x”.

Entonces, se demuestra que la generación de PET diario tendrá un aumento con el pasar de los años. La Tabla 4 detalla la información empleando la ecuación obtenida y los datos empleados.

Figura 5. Gráfico de generación de PET diario y ecuación lineal para determinar R²



Fuente: Elaborado con Microsoft Excel 2019.

Tabla 4. Generación de PET diario para la ciudad de Chiclayo 2023-2043

Item	N°	Año	Generación de PET diario (t/día)	Generación PET con ecuación lineal (t/día)	Generación PET con ecuación lineal (kg/día)
	1	2012	1.393	0.827	827
	2	2013	0.764	1.044	1044
	3	2014	0.846	1.260	1260
	4	2015	1.393	1.477	1477
	5	2016		1.694	1694
	6	2017		1.911	1911
	7	2018		2.128	2128
	8	2019	2.673	2.345	2345
	9	2020	2.442	2.562	2562
	10	2021	2.780	2.779	2779
	11	2022		2.996	2996
0	12	2023		3.213	3213
1	13	2024		3.429	3429
2	14	2025		3.646	3646
3	15	2026		3.863	3863
4	16	2027		4.080	4080
5	17	2028		4.297	4297
6	18	2029		4.514	4514
7	19	2030		4.731	4731
8	20	2031		4.948	4948
9	21	2032		5.165	5165
10	22	2033		5.382	5382
11	23	2034		5.598	5598
12	24	2035		5.815	5815
13	25	2036		6.032	6032
14	26	2037		6.249	6249
15	27	2038		6.466	6466
16	28	2039		6.683	6683
17	29	2040		6.900	6900
18	30	2041		7.117	7117
19	31	2042		7.334	7334
20	32	2043		7.551	7551

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, la oferta disponible de PET para el tiempo de vida útil del mecanismo triturador se puede verificar en la Tabla 4, dichos valores sirvieron para poder determinar la capacidad del mecanismo triturador.

Considerando que se quiere obtener el mejor beneficio con el diseño del mecanismo triturador, es que se ha considerado que la máquina opere de forma paulatina, es decir, con un trabajo de 8 horas diarias durante el 2023 y 2024, de 9 horas diarias para el 2025 y 2026, y así sucesivamente; donde

al final de la vida útil del mecanismo triturador, el trabajo fue de 16 horas diarias durante el 2039 al 2043, con el fin de obtener una eficiencia superior al 80% en cada año. Entonces, la capacidad del mecanismo triturador será:

Tabla 5. *Capacidad de trituración por año del mecanismo triturador propuesto*

Ítem	Año	Generación PET por día (kg/día)	Horas de trabajo (h/día)	Capacidad del mecanismo triturador (kg/h)
0	2023	3213	8	402
1	2024	3429	8	429
2	2025	3646	9	405
3	2026	3863	9	429
4	2027	4080	10	408
5	2028	4297	10	430
6	2029	4514	11	410
7	2030	4731	11	430
8	2031	4948	12	412
9	2032	5165	12	430
10	2033	5382	13	414
11	2034	5598	13	431
12	2035	5815	14	415
13	2036	6032	14	431
14	2037	6249	15	417
15	2038	6466	15	431
16	2039	6683	16	418
17	2040	6900	16	431
18	2041	7117	16	445
19	2042	7334	16	458
20	2043	7551	16	472

Fuente: *Elaboración propia.*

Entonces, se puede determinar que la máquina debe tener una capacidad de 472 kg/h, con el fin de que se emplee una máquina durante todo el tiempo de vida útil de la misma. Esto se puede verificar en la Tabla 6:

Tabla 6. Número de máquinas durante el tiempo de vida útil de la trituradora

Ítem	Año	Generación PET (kg/día)	Capacidad de trituración diaria (kg/día)	Eficiencia de máquina	Cantidad de máquinas (entero)
0	2023	3213	3776	85.09%	1
1	2024	3429	3776	90.81%	1
2	2025	3646	4248	85.83%	1
3	2026	3863	4248	90.94%	1
4	2027	4080	4720	86.44%	1
5	2028	4297	4720	91.04%	1
6	2029	4514	5192	86.94%	1
7	2030	4731	5192	91.12%	1
8	2031	4948	5664	87.36%	1
9	2032	5165	5664	91.19%	1
10	2033	5382	6136	87.71%	1
11	2034	5598	6136	91.23%	1
12	2035	5815	6608	88.00%	1
13	2036	6032	6608	91.28%	1
14	2037	6249	7080	88.26%	1
15	2038	6466	7080	91.33%	1
16	2039	6683	7552	88.49%	1
17	2040	6900	7552	91.37%	1
18	2041	7117	7552	94.24%	1
19	2042	7334	7552	97.11%	1
20	2043	7551	7552	99.99%	1

Fuente: Elaboración propia.

Se puede verificar que a medida que pasan los años, la eficiencia de la máquina respecto a la trituración es superior al 85%.

4.2. Dimensionamiento de elementos de máquina para mecanismo triturador

Para el dimensionamiento adecuado de los elementos de máquina que formaron parte del mecanismo triturador se tuvo en consideración ciertos parámetros, los cuales se detallan a continuación:

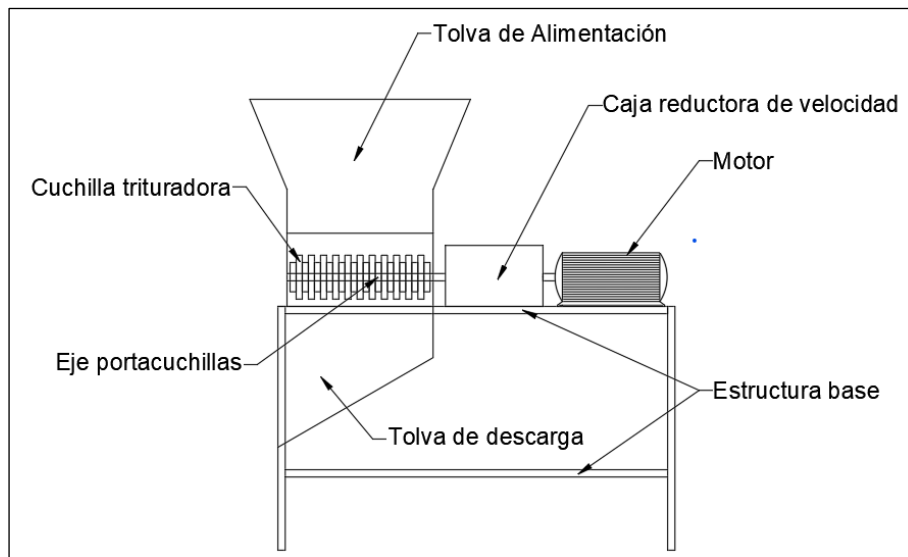
$$\tau_{PET} = 72 \text{ MPa (Zargar \& Singla, 2020)}$$

$$n_{eje} = 80 \text{ rpm (Janfrex, 2022)}$$

$$C_{tolva} = 472 \text{ kg/h}$$

En la Figura 6 se puede apreciar los elementos de máquina que serán dimensionados.

Figura 6. Bosquejo del mecanismo triturador y sus elementos de máquina



Fuente: Elaborado con AutoCAD 2022.

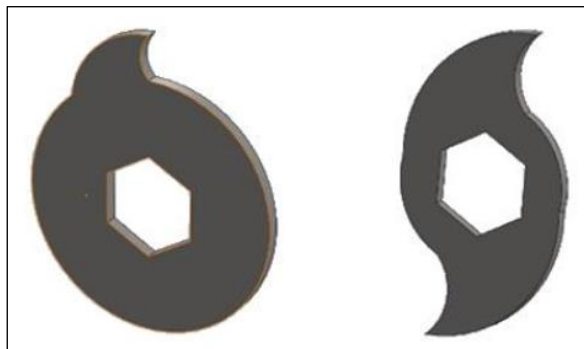
Los principales elementos del mecanismo triturador son:

- Cuchilla trituradora
- Eje portacuchillas
- Tolva de alimentación
- Estructura base
- Motor eléctrico

4.2.1. Cuchilla trituradora

De acuerdo con Pedraza Yepes et al. (2018), el modelo de cuchilla más empleado se aprecia en la Figura 7, y Wong et al. (2022) afirma que son más resistentes y eficientes.

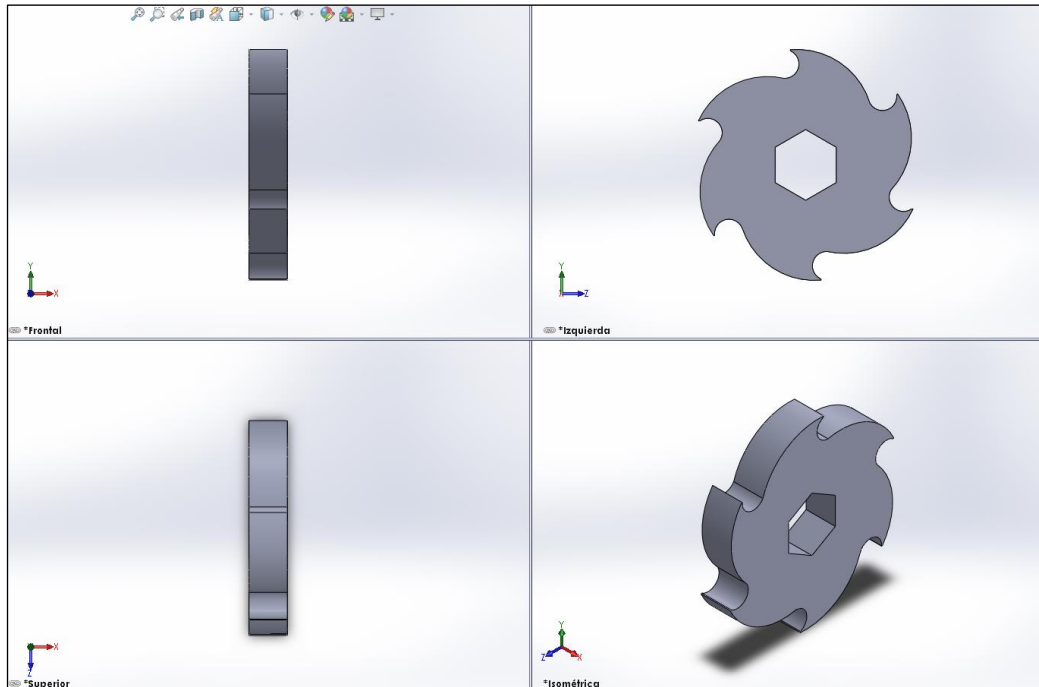
Figura 7. Tipo de cuchilla trituradora más eficiente



Fuente: (Pedraza Yepes et al., 2018)

La cuchilla tiene un diámetro de 180 mm con un espesor de 30 mm, y debe fabricarse en Acero AISI 1045 estirado en frío. En la Figura 8 se aprecia el modelado de la misma en SolidWorks.

Figura 8. Modelado de cuchilla trituradora para mecanismo triturador



Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

Posteriormente, se realizó el análisis estático para determinar los esfuerzos de Von Mises, el factor de seguridad mínimo, los desplazamientos para determinar si cumple con lo requerido. El esfuerzo ingresado al programa fue de 72 MPa, que pertenece al PET y que se debe sobrepasar para lograr triturarlo, el mismo que se aplicó en la punta de la cuchilla trituradora y luego se ejecutó el análisis determinando lo siguiente:

De la Figura 9 se observa que el máximo esfuerzo de Von Mises es de 119.5 MPa, el cual se encuentra muy por debajo del esfuerzo máximo que puede soportar el material empleado en la cuchilla trituradora.

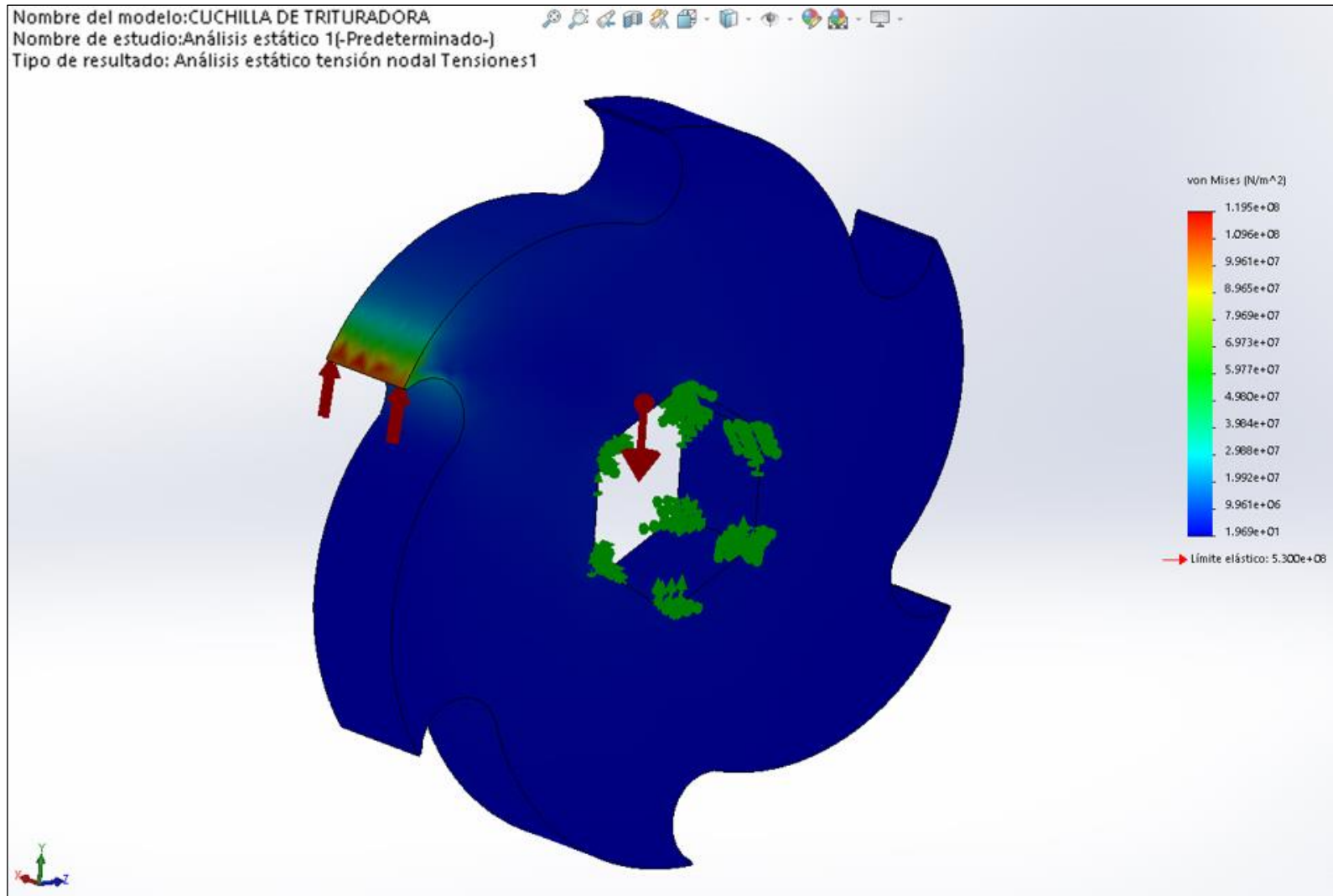
De la Figura 10 se puede decir que el desplazamiento máximo obtenido del análisis fue de 0.01449 mm, el cual ocurre en la cuchilla donde se da la trituración, pero cabe precisar, que se ve exagerado el desplazamiento debido a que se tiene una escala de deformación de 1381.17, esto con el

fin de poder ver mejor donde se da dicha deformación.

En la Figura 11 se aprecia mejor el desplazamiento ocurrido en la cuchilla, pero considerando una escala de deformación de 1, es decir, tal cual como se da en la realidad, que prácticamente es imperceptible.

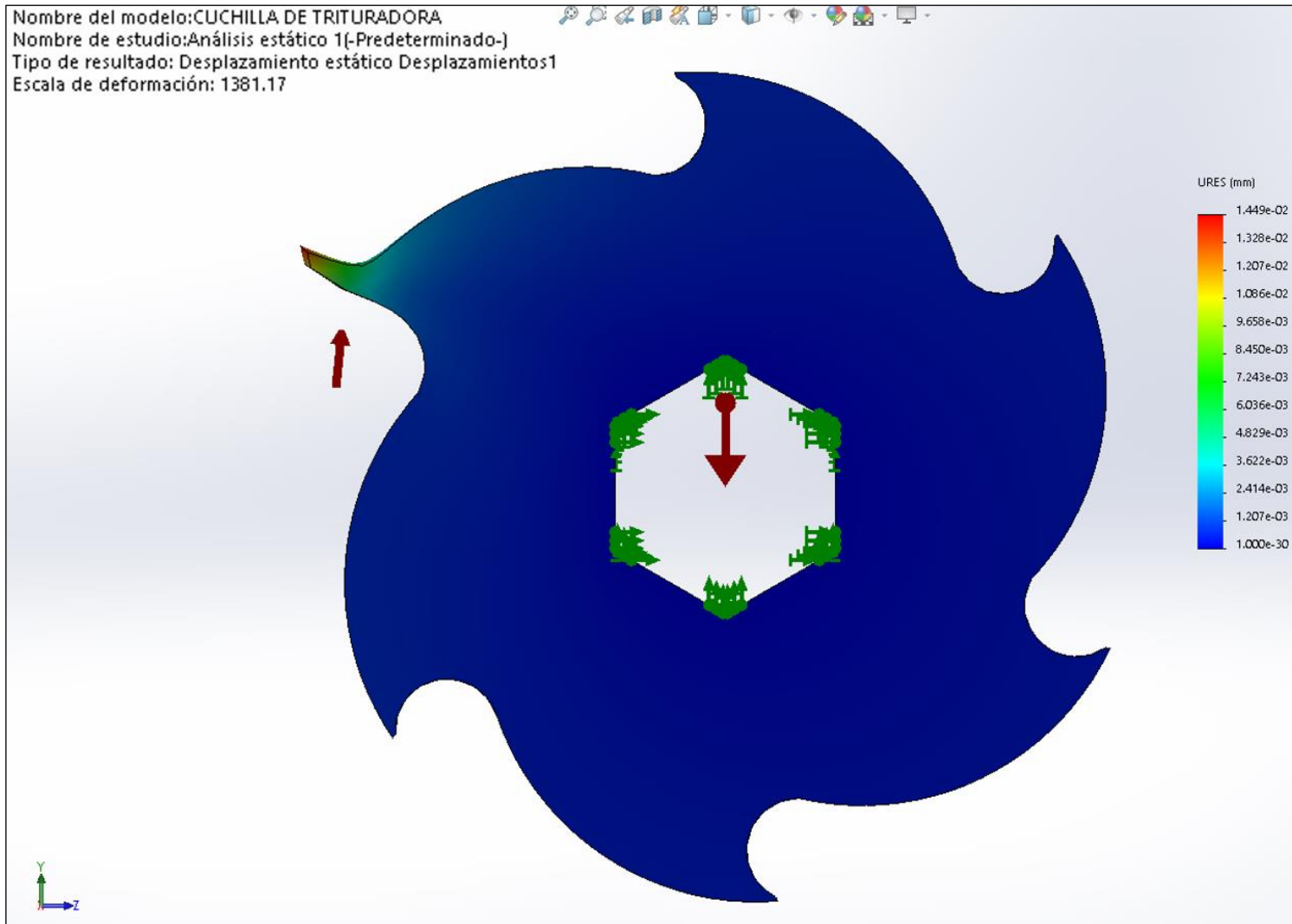
De la Figura 12 se observa en la simulación que el mínimo factor de seguridad obtenido es de 4.434, cuyo valor concuerda con Juvinall & Marshek (2013), quien menciona que el factor de seguridad puede estar entre 4 a 5 para ciertos elementos en donde los esfuerzos son algo difíciles de determinar de forma manual, pero que con algún software CAD esto sea más sencillo.

Figura 9. Esfuerzos de Von Mises obtenidos del análisis estático



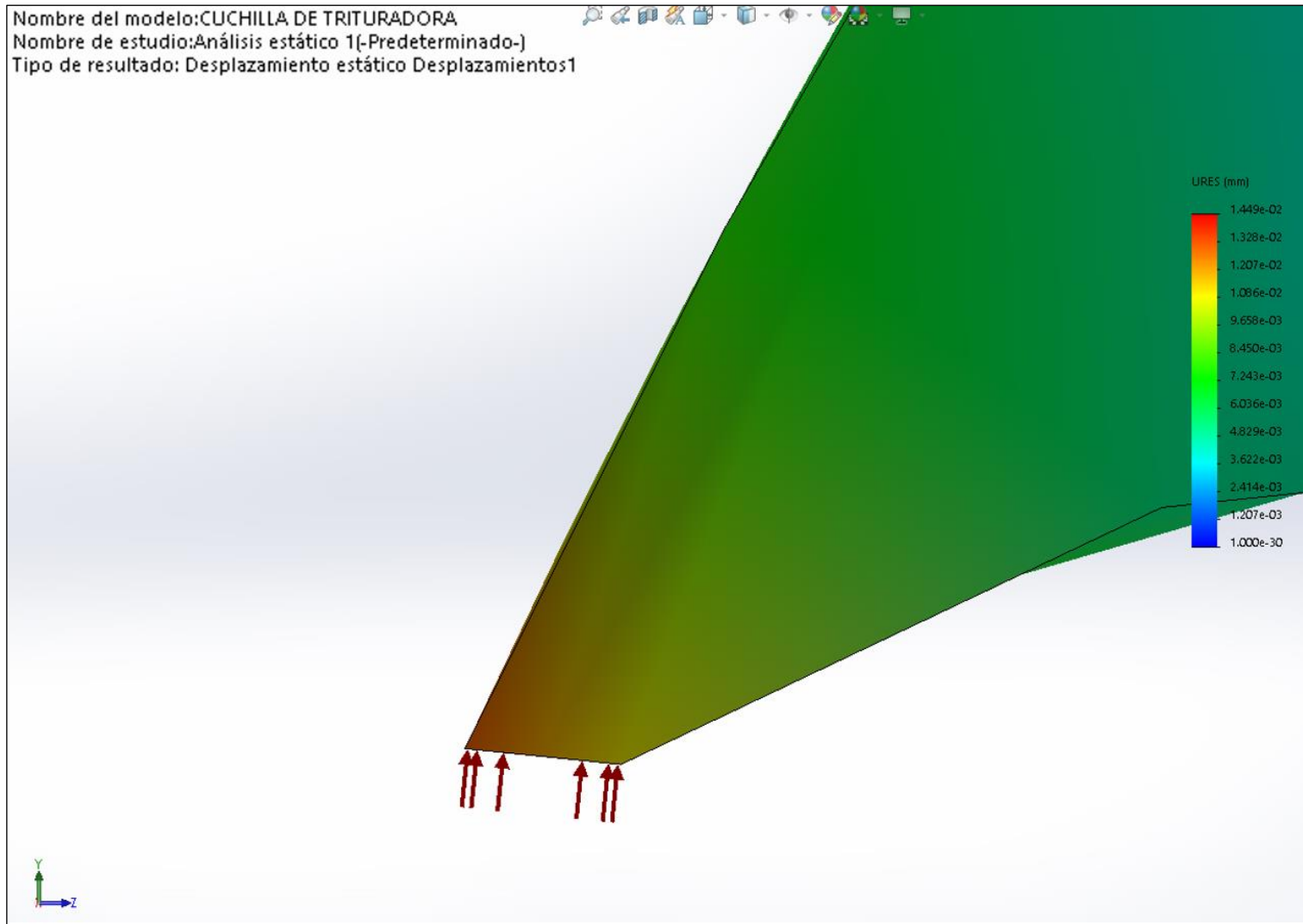
Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

Figura 10. Desplazamientos estáticos obtenidos del análisis estático (Escala de deformación: 1381.17)



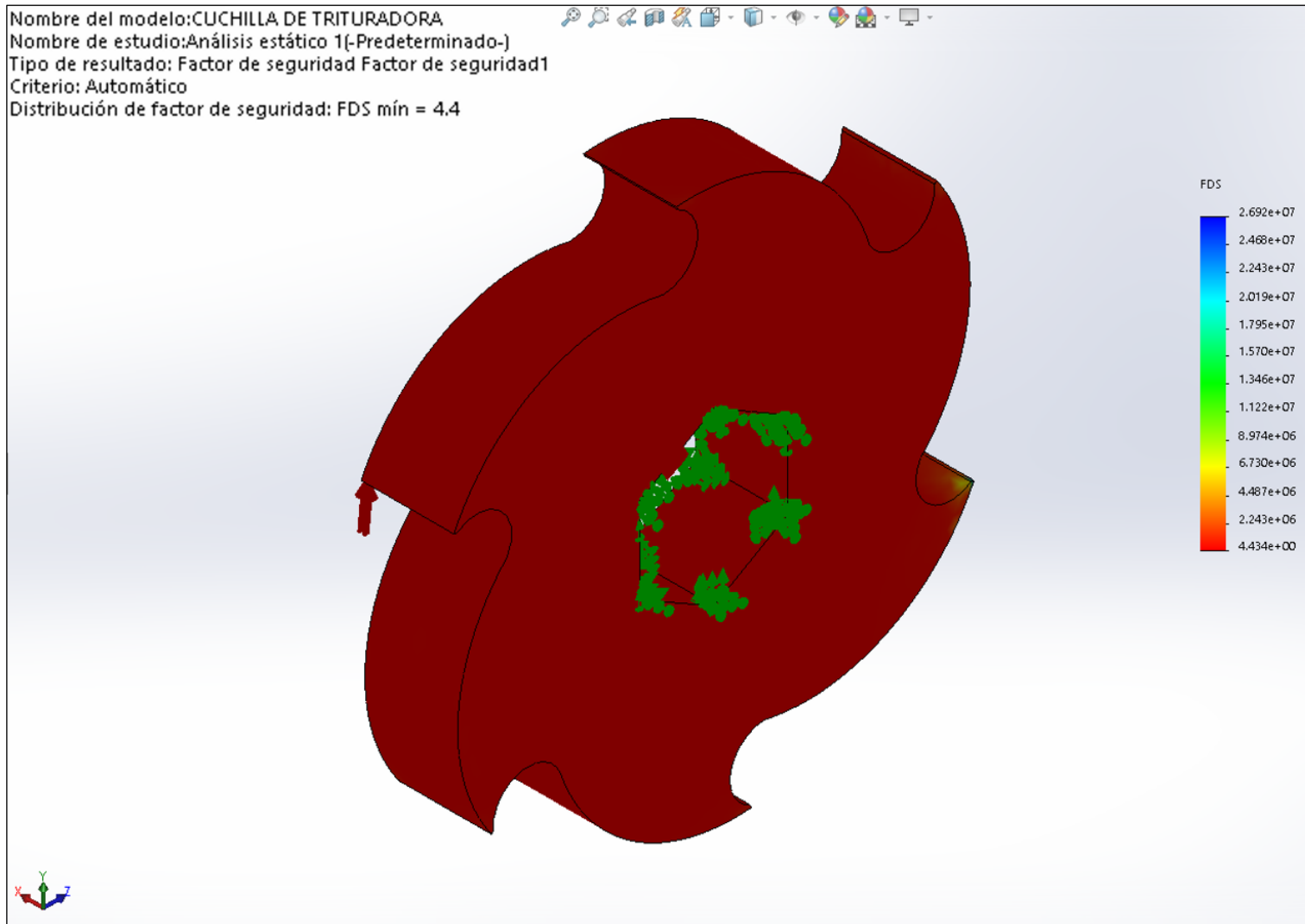
Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

Figura 11. Desplazamientos estáticos obtenidos del análisis estático (Escala de deformación: 1)



Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

Figura 12. Factores de seguridad obtenidos del análisis estático



Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

4.2.2. Eje portacuchillas

Para poder realizar el modelado del eje, es necesario conocer su longitud, la misma que se puede calcular con la capacidad del mecanismo triturador y una separación adecuada entre las cuchillas para que el material triturado pueda pasar sin problemas al momento del proceso de trituración. Es decir, que se empleó la ecuación de continuidad, siendo empleada en la Ley de conservación de la masa (Cengel & Cimbala, 2020). Para lo cual es necesario contar con la velocidad de rotación del eje, que de acuerdo con Janfrex (2022), la velocidad para trituradoras de plástico debe estar en el rango de 3.6 a 83 rpm, ya que se necesita un torque alto para lograr triturar dicho material plástico debido a su alta resistencia. Por lo que se seleccionó una velocidad de rotación del eje de 80 rpm para el mecanismo triturador. Entonces se tiene que:

$$n_{eje} = 80 \text{ rpm}$$

$$e = 0.3 \text{ mm}$$

$$\dot{m}_{tolva} = 472 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \approx 0.1311 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\rho_{PET} = 1390 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Determinando el flujo volumétrico:

$$\dot{V}_{tolva} = \frac{\dot{m}_{tolva}}{\rho_{PET}}$$

$$\dot{V}_{tolva} = \frac{0.1311 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1390 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.000094317 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

La velocidad en la punta de la cuchilla trituradora es de:

$$v_{cuchilla} = \omega_{eje} \times r_{cuchilla}$$

$$v_{cuchilla} = \frac{80 (2 \pi \text{ rad})}{60 \text{ s}} \times 0.09048 \text{ m} = 0.758 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ahora, calculando la longitud del eje portacuchillas:

$$L_{eje\ portacuchillas} = \frac{\dot{V}_{tolva}}{v_{cuchilla} \times e}$$

$$L_{eje\ portacuchillas} = \frac{0.000094317 \frac{m^3}{s}}{0.758 \frac{m}{s} \times 0.0003\ m} = 0.42\ m$$

Entonces, la longitud que se calculó para el eje es de 0.42 m o 420 mm, como la cuchilla tiene un espesor de 30 mm, se necesitó 7 cuchillas trituradoras y 7 separadores para las cuchillas, lo cual se aprecia en la Figura 13.

Del análisis estático realizado al eje portacuchillas considerando las cuchillas y los separadores de cuchillas, se obtuvo los siguientes resultados:

De la Figura 14 se puede indicar que el máximo esfuerzo de Von Mises calculado en el eje portacuchillas es de 99.99 MPa, valor muy por debajo de la resistencia del material empleado.

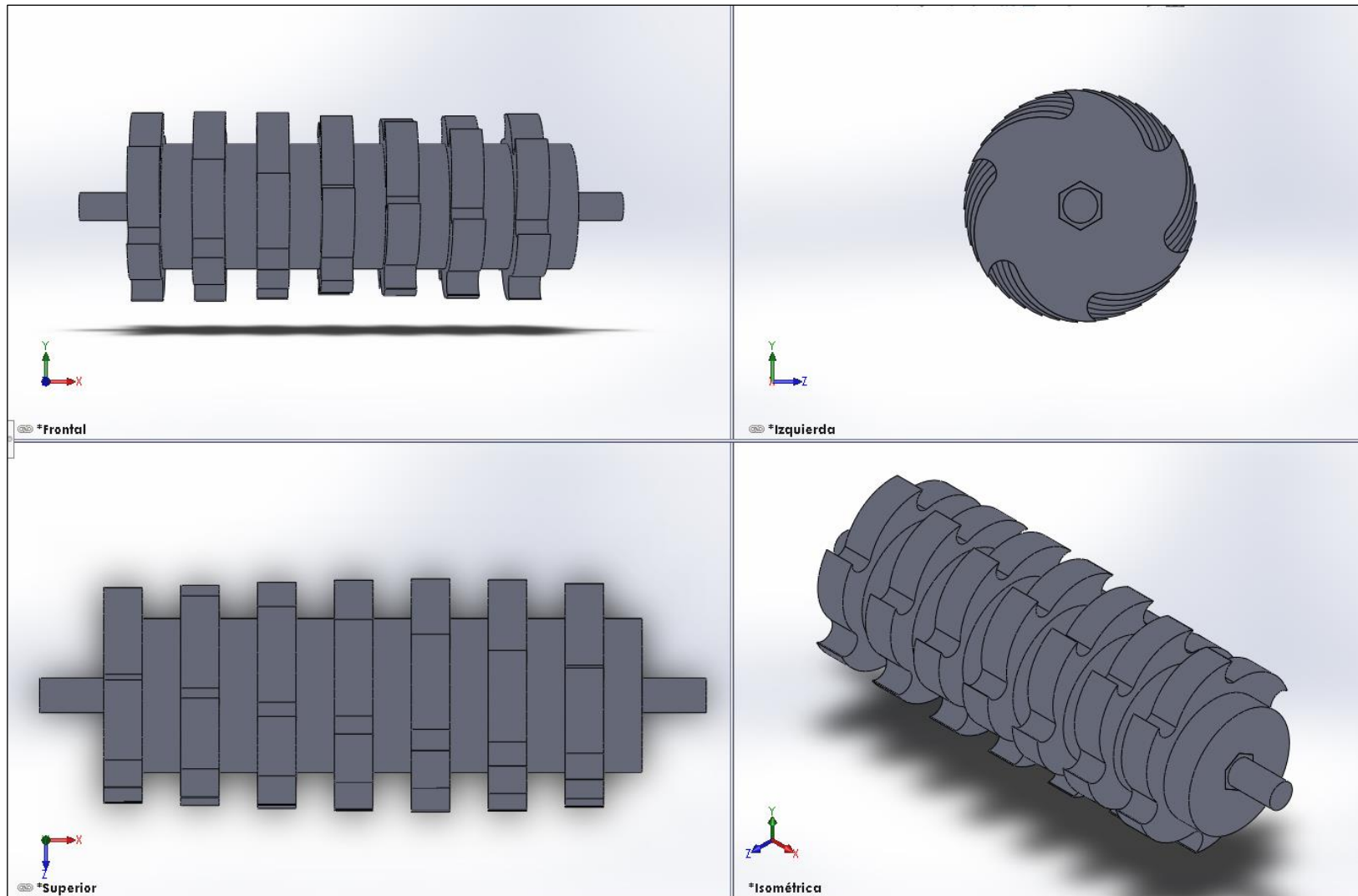
De la Figura 15 se puede verificar que se obtuvo un desplazamiento máximo en la cuchilla de 0.01939 mm, con una escala de deformación de 2881.51 para tener una mejor visualización de dichas deformaciones.

En la Figura 16 se aprecia la deformación o desplazamiento, pero considerando una escala de deformación de 1, es decir, como se daría en la realidad, siendo un valor prácticamente imperceptible.

De la Figura 17 se aprecia que el factor obtenido fue de 5.300, siendo un valor bastante elevado, lo que brindará una elevada vida útil del mecanismo triturador de PET.

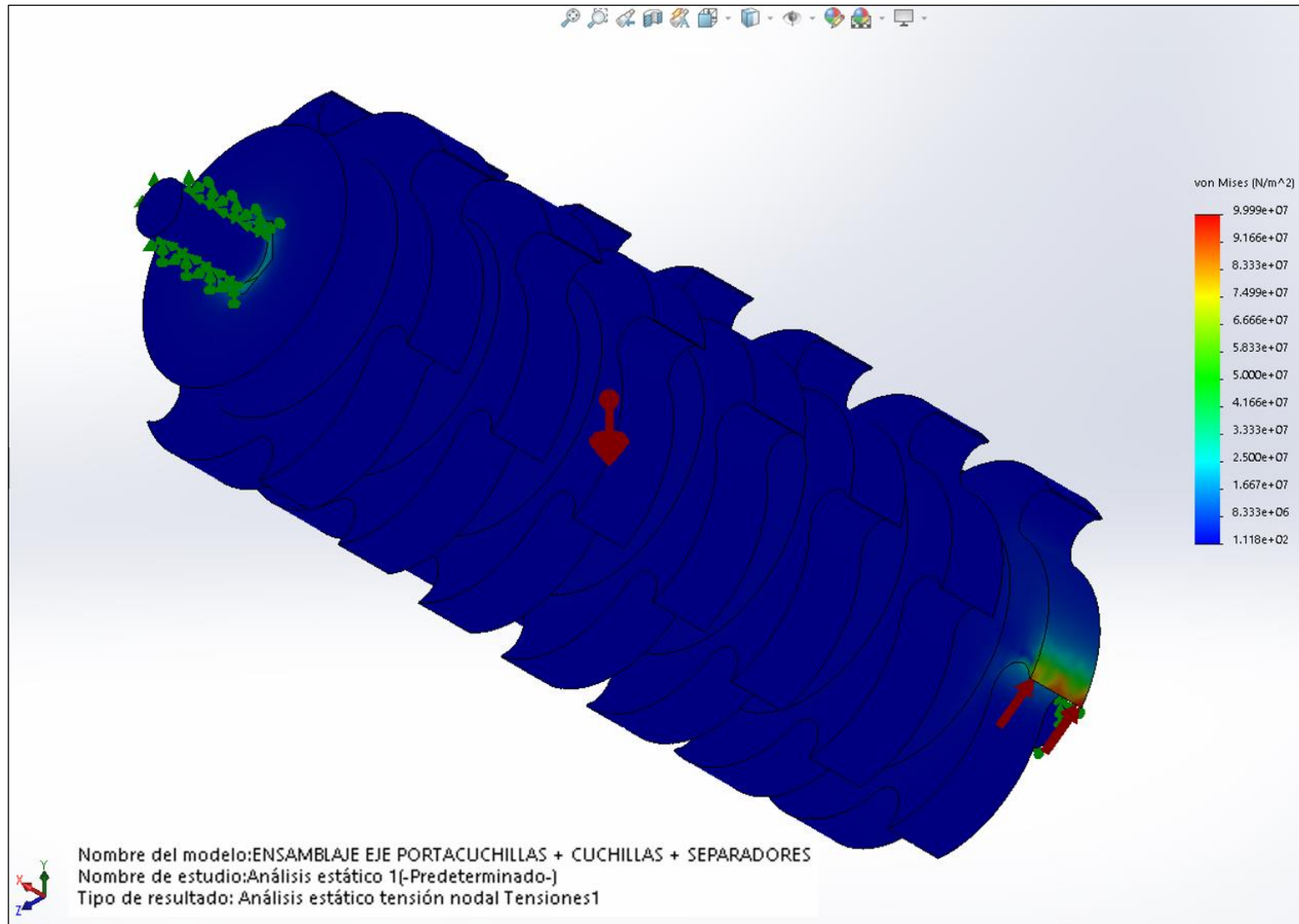
En la Figura 18 se visualizan las fuerzas resultantes en los apoyos del eje, los cuales sirvieron para el cálculo de los rodamientos.

Figura 13. Modelado de eje portacuchillas, cuchillas y separadores de cuchillas



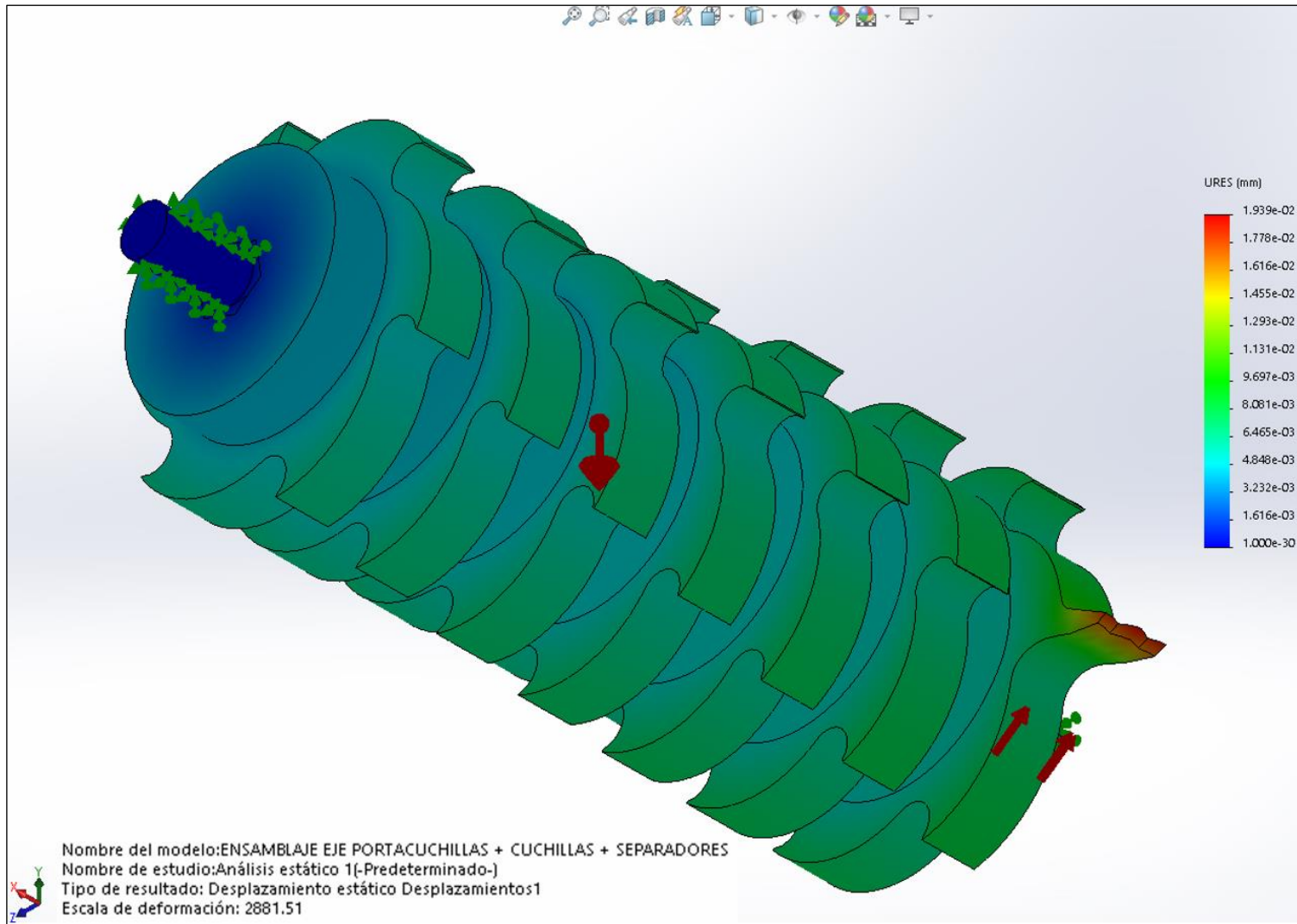
Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

Figura 14. Esfuerzos de Von Mises obtenidos en eje portacuchillas



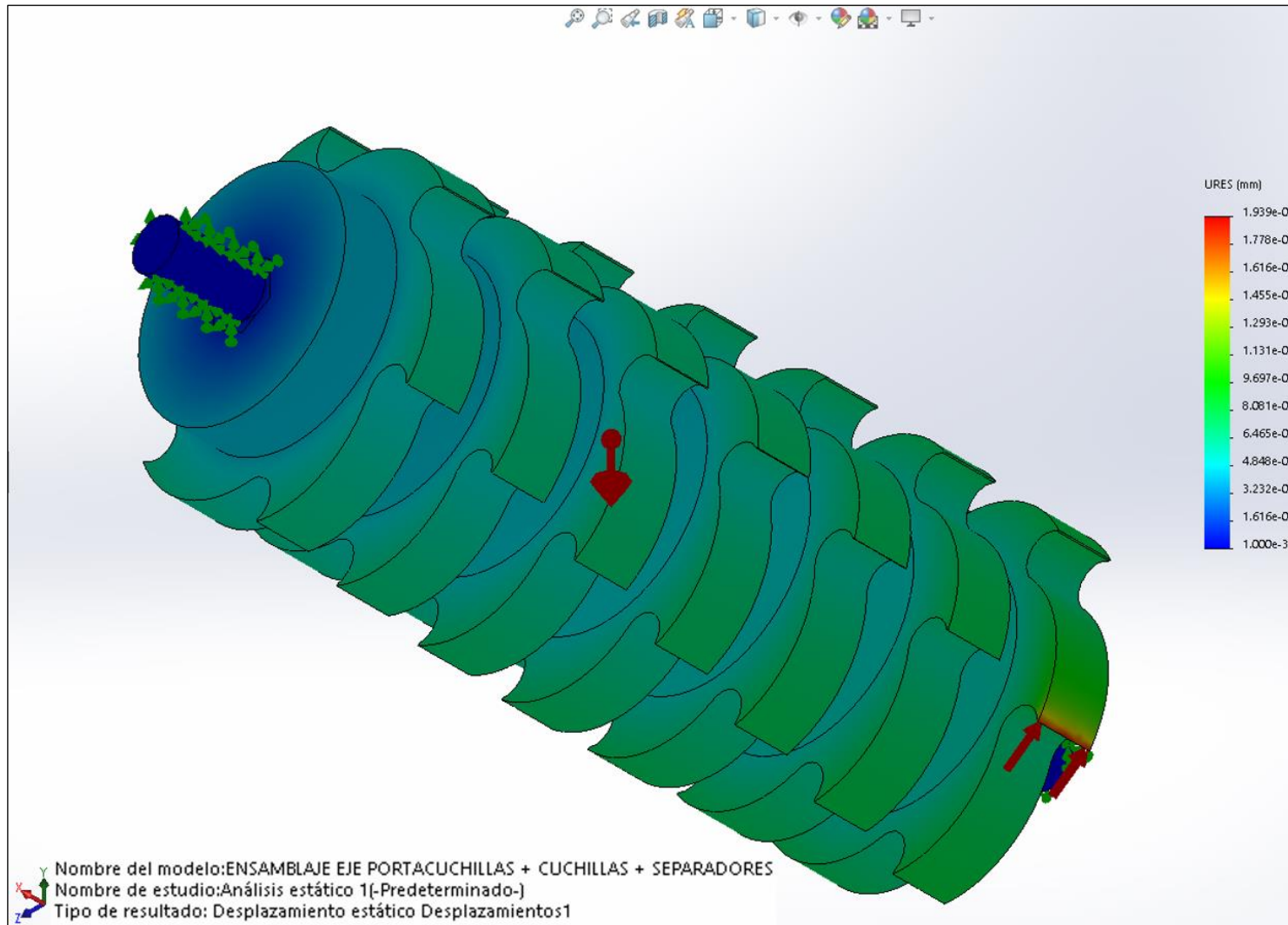
Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

Figura 15. Desplazamientos obtenidos en eje portacuchillas (Escala de deformación=2881.51)



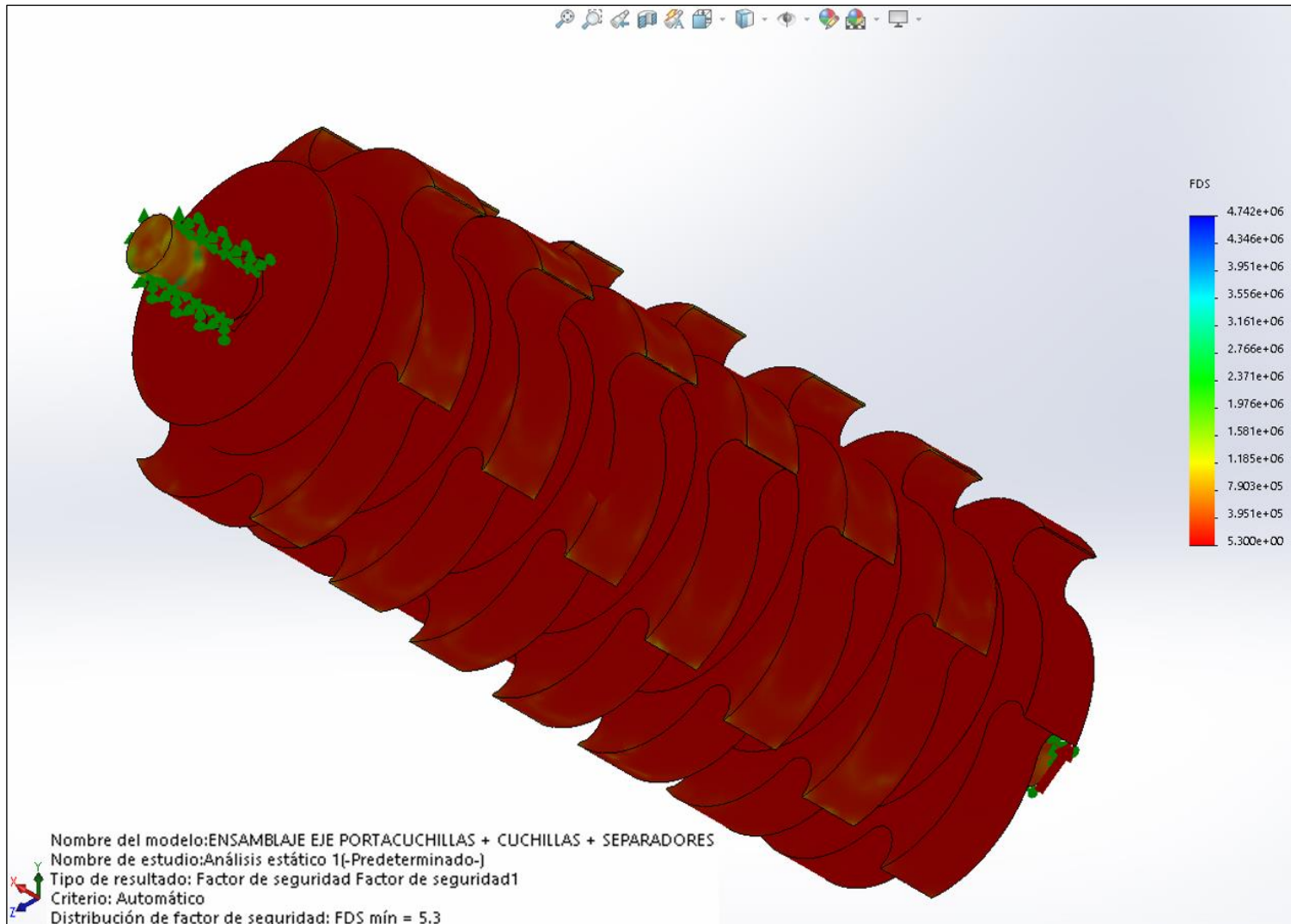
Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

Figura 16. Desplazamientos obtenidos en eje portacuchillas (Escala de deformación=1)



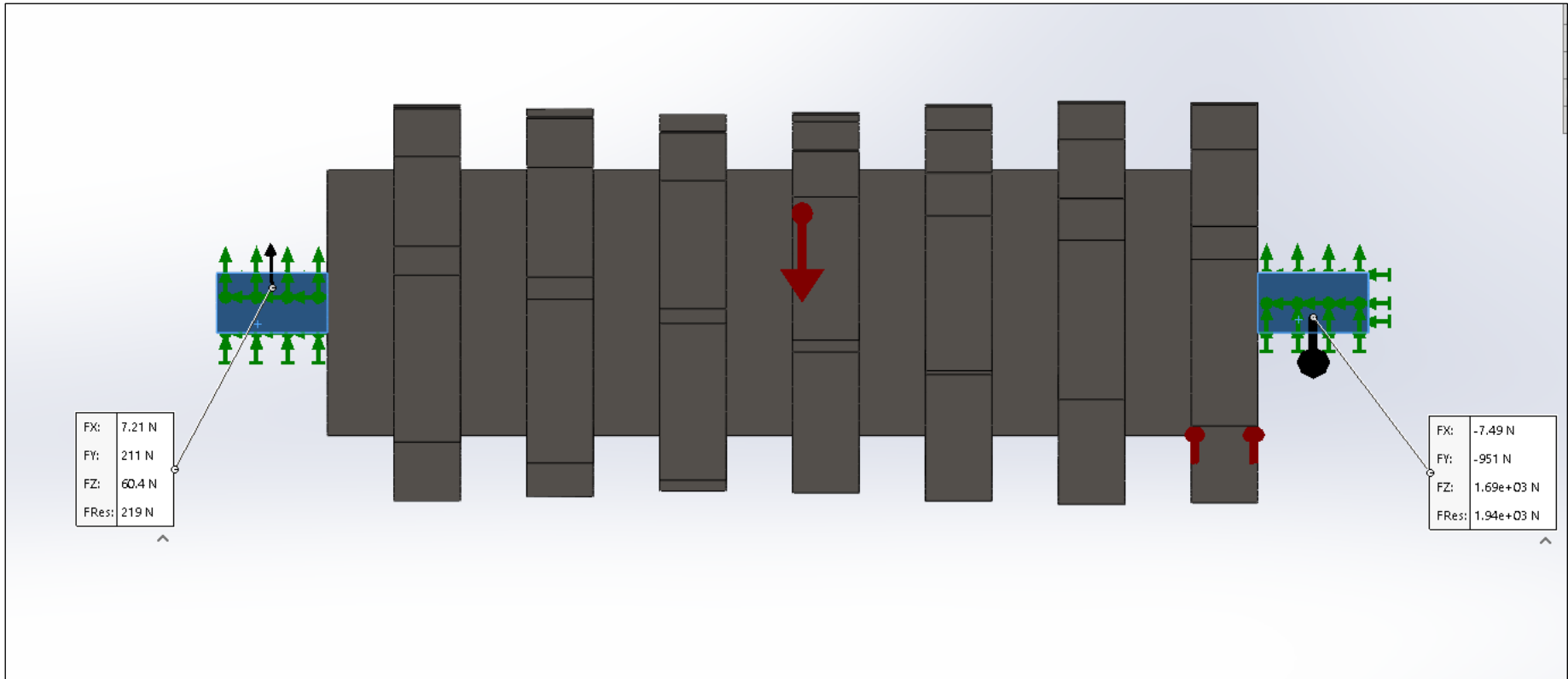
Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

Figura 17. Factores de seguridad obtenidos en eje portacuchillas



Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

Figura 18. Fuerzas resultantes en los apoyos del eje portacuchillas



Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

4.2.3. Tolva de alimentación

La tolva de alimentación tuvo una capacidad de 472 kg/h, pero cabe precisar, que cada 20 min se alimentará de PET al mecanismo triturador, por lo que la tolva tuvo la siguiente capacidad:

$$m_{tolva} = C_{tolva} \cdot tiempo$$
$$m_{tolva} = 472 \frac{kg}{h} \cdot 20 \text{ min} \cdot \frac{1 h}{60 \text{ min}} = 157.33 \text{ kg}$$

Ahora, se determinó el volumen requerido para poder cumplir con lo requerido, entonces se tuvo lo siguiente:

$$\rho_{PET} = 1390 \frac{kg}{m^3}$$
$$V_{tolva} = \frac{m_{tolva}}{\rho_{PET}}$$
$$V_{tolva} = \frac{157.33 \text{ kg}}{1390 \frac{kg}{m^3}} = 0.1132 \text{ m}^3$$

Al realizar el modelado de la tolva en SolidWorks, se obtuvo un volumen para el PET de 0.1289 m³, superior al obtenido, cabe precisar que al caer el PET en la caja donde se portan los ejes con las cuchillas trituradoras, se tiene un volumen adicional, por lo que la capacidad de la tolva no se rebalsará, sino que fue de 87.82%. En la Figura 19 se aprecia el modelado de la Tolva de alimentación. El material seleccionado es el Acero Galvanizado con un espesor de plancha de 2 mm.

Luego, se ejecutó el análisis estático para determinar los esfuerzos de Von Mises, deformaciones, factor de seguridad mínimo.

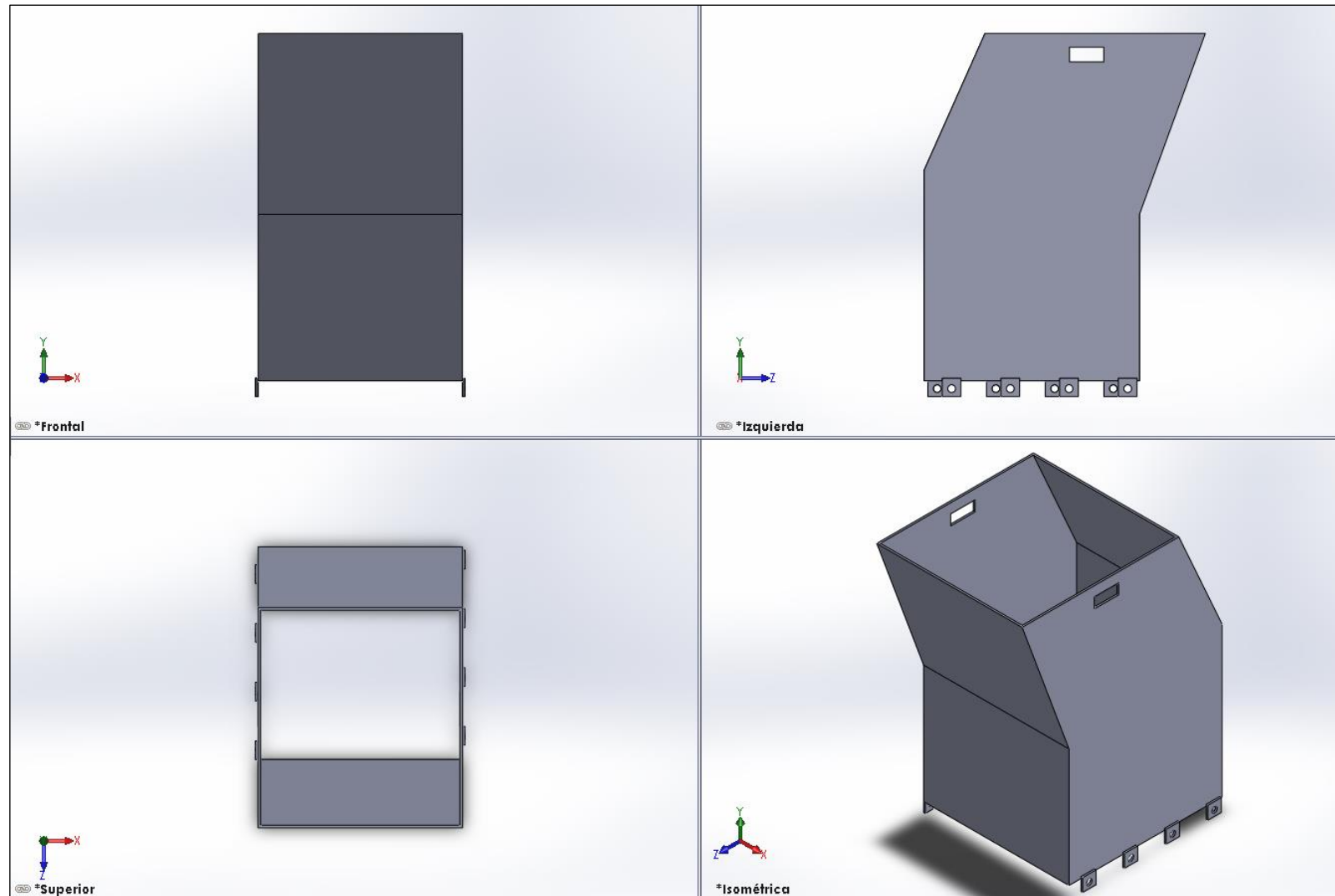
En la Figura 20 se observa de la simulación los esfuerzos de Von Mises, donde el máximo esfuerzo fue de 16.02 MPa, valor muy inferior al que puede resistir el Acero Galvanizado.

En la Figura 21 se observa del análisis estático los desplazamientos calculados, siendo el máximo desplazamiento de 0.4854 mm, que se da en la parte frontal superior y posterior superior, pero con una escala de deformación de 162.719.

Figura 22 se aprecia los desplazamientos, pero considerando una escala de deformación de 1, observándose que prácticamente es realmente bajo e imperceptible.

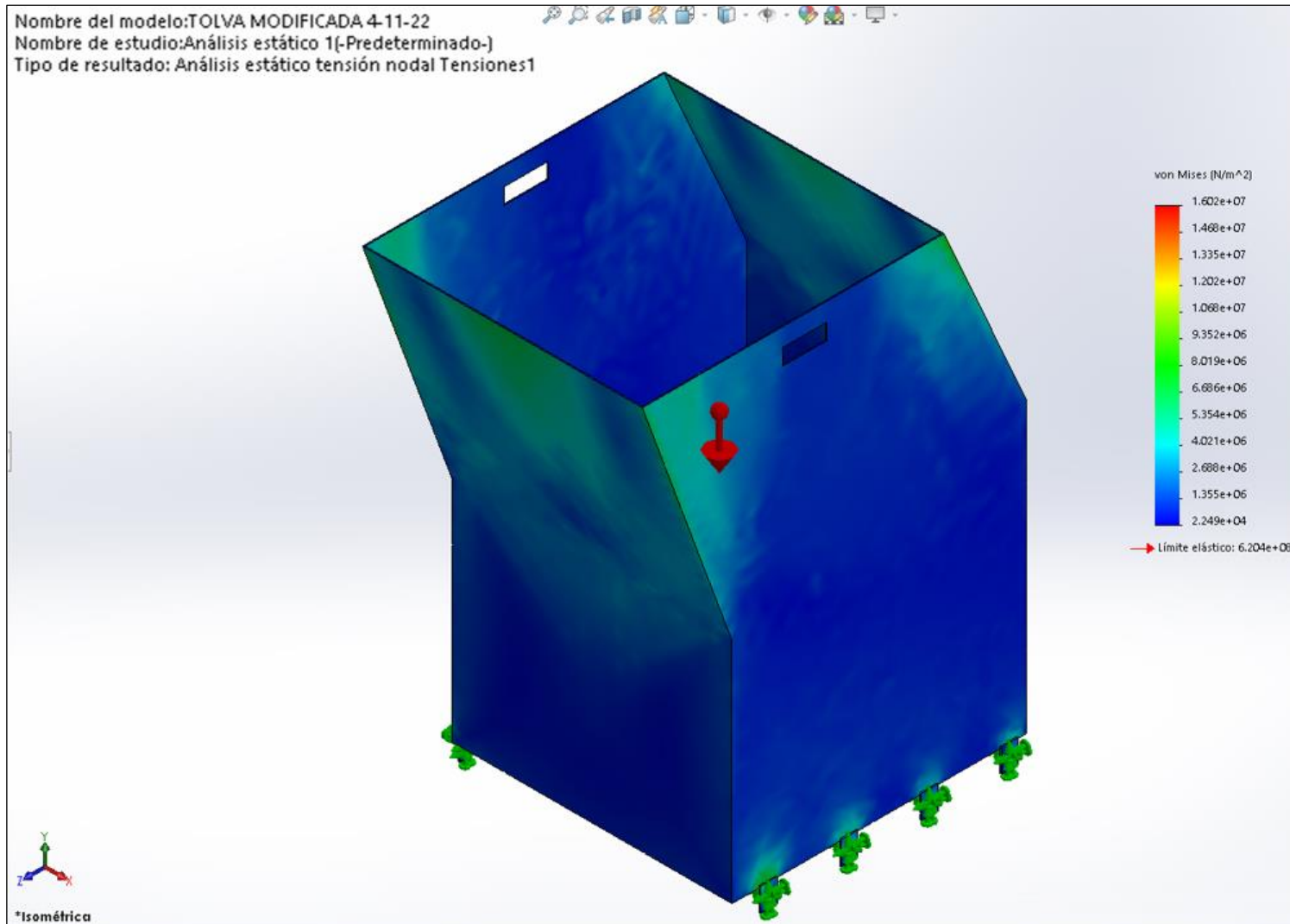
En la Figura 23 se observan los factores de seguridad obtenidos del análisis estático, siendo el mínimo de 38.74 y el máximo de 27580.

Figura 19. Modelado de la tolva de alimentación



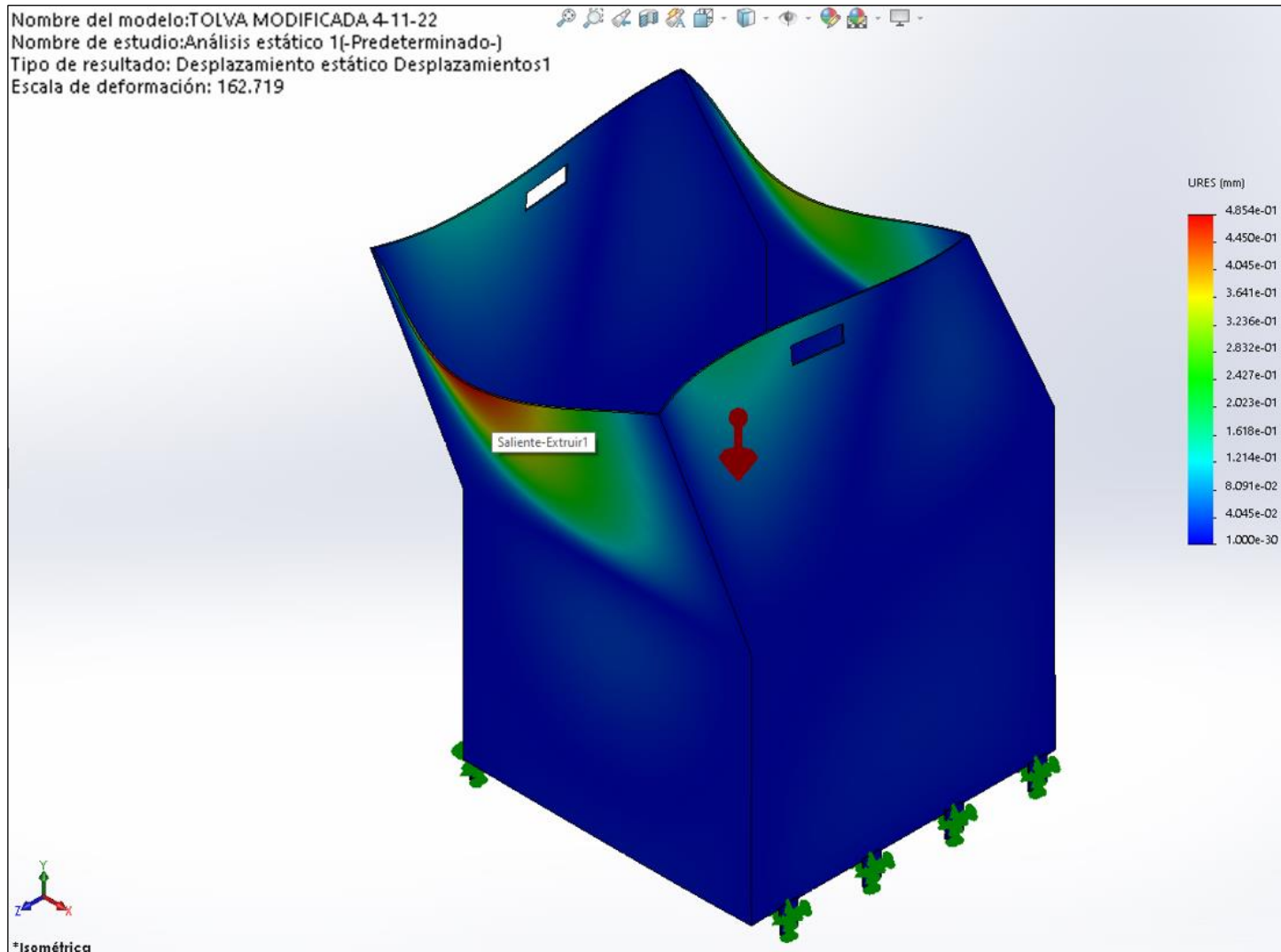
Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

Figura 20. Esfuerzos de Von Mises obtenidos en la Tolva de alimentación



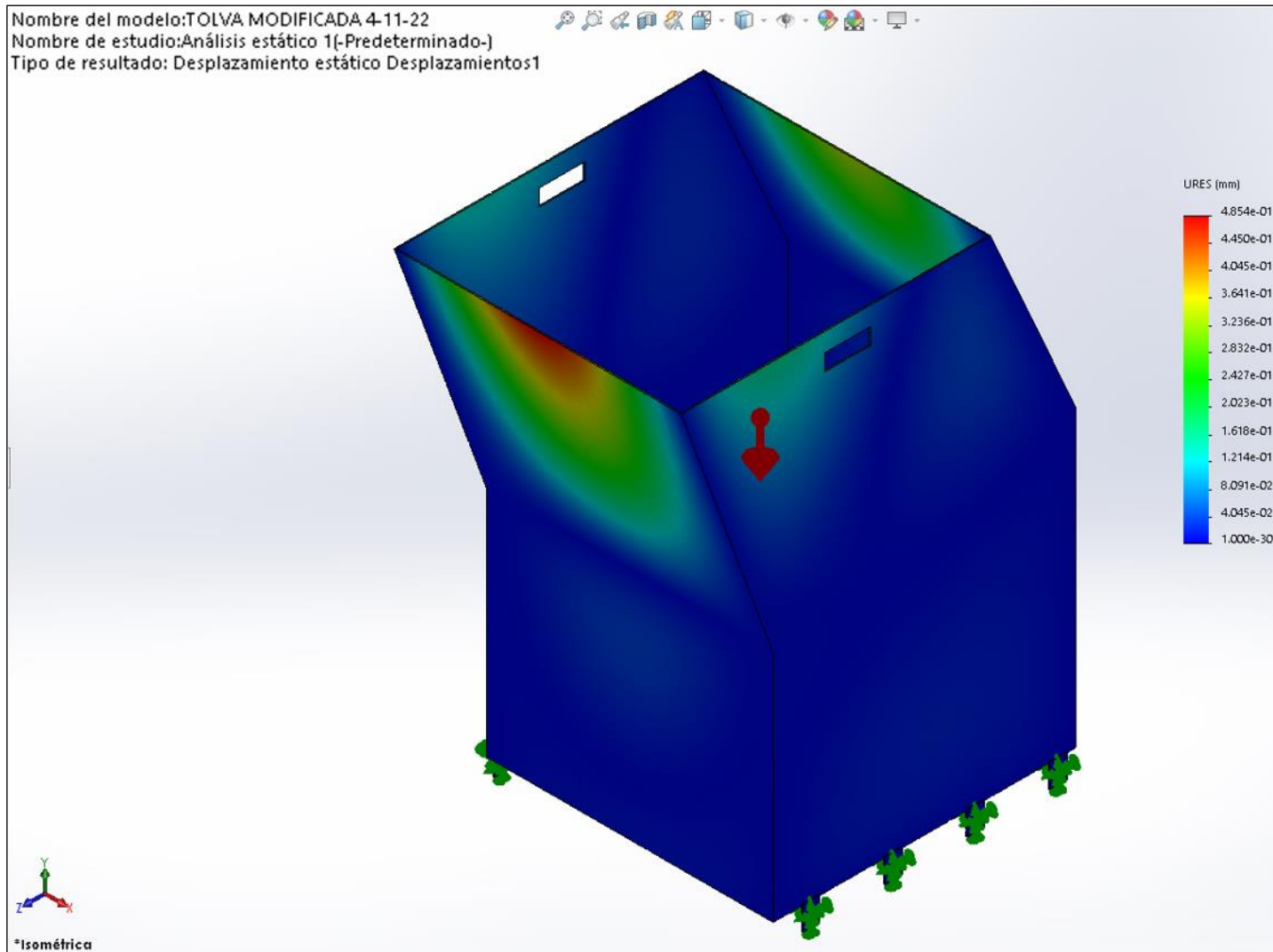
Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

Figura 21. Desplazamientos obtenidos en la Tolva de alimentación (Escala de deformación: 162.719)



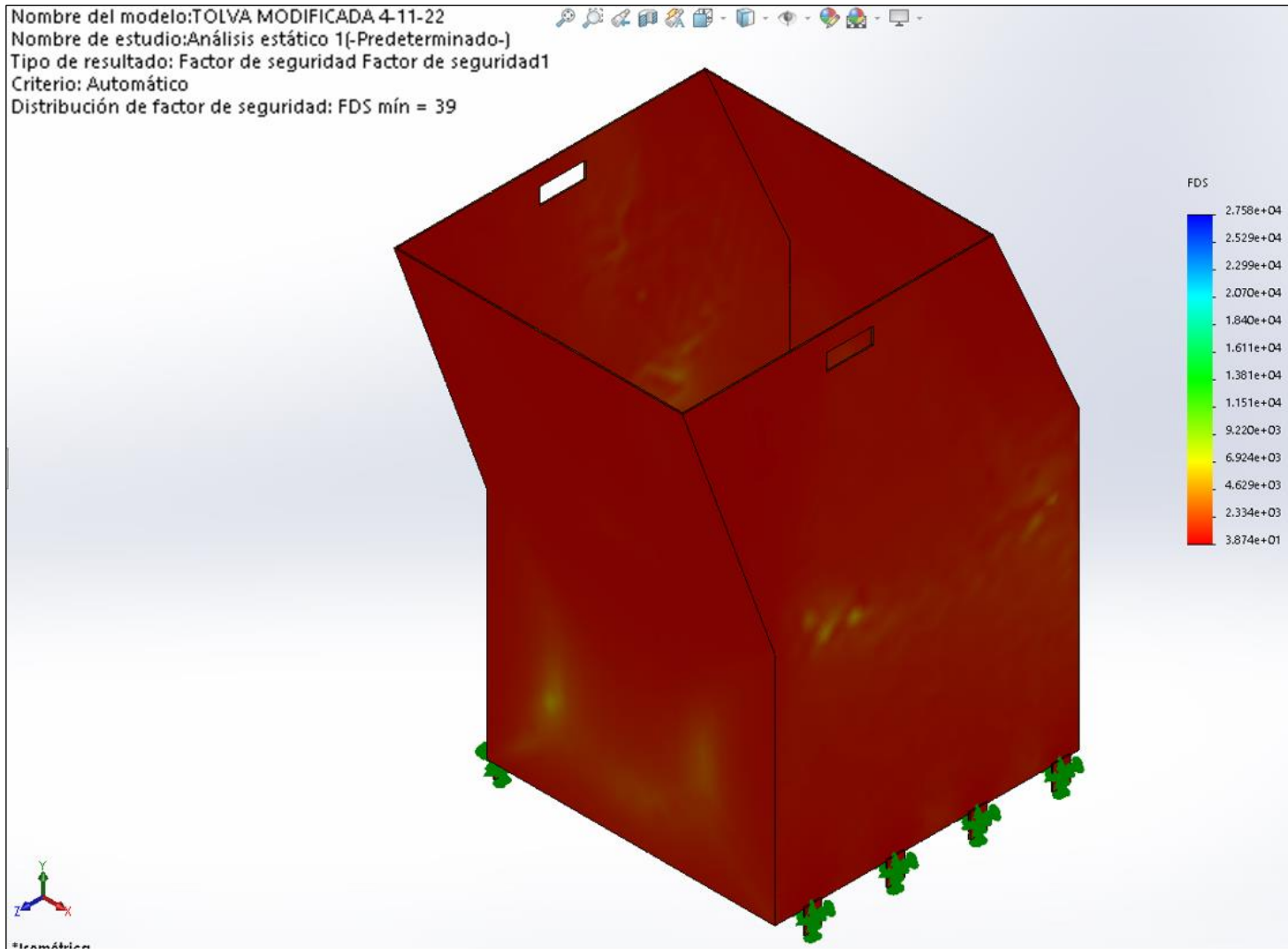
Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

Figura 22. Desplazamientos obtenidos en la Tolva de alimentación (Escala de deformación: 1)



Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

Figura 23. Factores de seguridad obtenidos en la Tolva de alimentación



Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

4.2.4. Selección de rodamientos

Para seleccionar adecuadamente los rodamientos, se tuvo en consideración las cargas o fuerzas que actuarán en el mismo, de la Figura 18 se aprecia que las fuerzas obtenidas de la simulación son las siguientes:

$$F_x = -7.49 \text{ N}$$

$$F_y = -951 \text{ N}$$

$$F_z = 1690 \text{ N}$$

Donde, en los ejes X e Y actúan las fuerzas radiales, y en el eje Z actúan las cargas axiales, lo que indica que el rodamiento debe soportar ambos tipos de fuerzas y en referencia a SKF (2019), debe ser empleado rodamiento rígido de bolas, por lo tanto, se empleará la metodología descrita por dicho fabricante para la selección adecuada de los rodamientos. Entonces se tuvo lo siguiente:

$$F_{radial} = F_r = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

$$F_{radial} = F_r = \sqrt{(-7.49 \text{ N})^2 + (-951 \text{ N})^2} = 951.03 \text{ N}$$

$$F_{axial} = F_a = F_z$$

$$F_{axial} = F_a = 1690 \text{ N}$$

En primer lugar, se determinó lo siguiente:

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{1690 \text{ N}}{951.03 \text{ N}} = 1.777$$

Seleccionando un rodamiento SKF 62305-2RS1, con parámetros:

$$C = 22.5 \text{ kN}$$

$$C_o = 11.60 \text{ kN}$$

$$d = 25 \text{ mm}$$

$$f_o = 12$$

Seguidamente, se calculó el factor siguiente:

$$f_o \cdot \frac{F_a}{C_o} = 12 \cdot \frac{1690 \text{ N}}{11600 \text{ N}} = 1.748$$

Interpolando de acuerdo a los valores de la Tabla 9 del catálogo de SKF, para determinar el valor de “e”:

$$e = 0.321$$

Posteriormente, se realizó la comparación entre la relación obtenida de dividir la carga axial y radial, la cual era mayor al valor de “e”, por lo tanto, se empleó la ecuación siguiente:

$$P = X \cdot F_{radial} + Y \cdot F_{axial}$$

Donde los valores de X e Y, se deben determinar al interpolar los valores de la Tabla 9 del catálogo de SKF. Los cuales son:

$$X = 0.56$$

$$Y = 1.375$$

Sustituyendo dichos valores, la carga equivalente fue de:

$$P = 0.56 (951.03 \text{ N}) + 1.375 (1690 \text{ N}) = 2856.33 \text{ N}$$

$$P = 2.85633 \text{ kN}$$

Seguidamente, se consideró que los rodamientos deben tener una vida útil de 96360 horas, por lo tanto, se tuvo que:

$$n_{\text{eje portacuchillas}} = 80 \text{ rpm}$$

$$p = 3$$

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 n} \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

Reemplazando los datos:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 (80 \text{ rpm})} \left(\frac{22.5 \text{ kN}}{2.85633 \text{ kN}} \right)^3 = 101831.27 \text{ h}$$

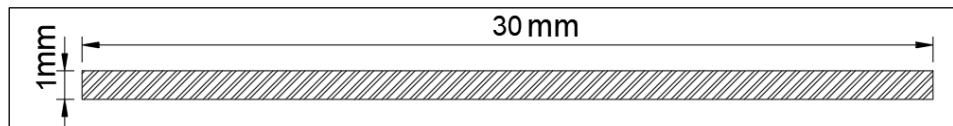
Lo cual cumple con lo requerido por el mecanismo triturador, por lo tanto, se seleccionó rodamientos SKF 62305-2RS1, en ambos extremos, ya que las cuchillas van de forma unitaria triturando, por lo que cuando la última

cuchilla tritura el PET, se invierten las fuerzas en los apoyos, es por ello, que se seleccionó los mismos rodamientos.

4.2.5. Dimensionamiento del motor eléctrico

Para determinar la potencia del motor, se debe calcular la fuerza de corte producida en las cuchillas trituradoras de PET. El área de triturado de PET efectuado por la cuchilla trituradora se detalla en la Figura 24.

Figura 24. Sección de PET que tritura la cuchilla



Fuente: Elaborado con AutoCAD 2022.

Los datos empleados para determinar la fuerza de corte son:

$$b = 30 \text{ mm} = 0.03 \text{ m}$$

$$h = 1 \text{ mm} = 0.001 \text{ m}$$

El área triturada es de:

$$A = b \cdot h$$

$$A = (0.03 \text{ m})(0.001 \text{ m}) = 0.00003 \text{ m}^2$$

Ahora, calculando la fuerza de corte:

$$F_{\text{corte}} = \tau_{\text{PET}} \cdot A$$

$$F_{\text{corte}} = \left(72 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right) (0.00003 \text{ m}^2) = 2160 \text{ N}$$

De acuerdo con Juvinal & Marshek (2013), recomienda un factor de seguridad de 2, para que la máquina no se sobreesfuerce y pueda cumplir con su vida útil sin problemas.

$$FS = 2$$

$$F_{\text{diseño}} = FS \cdot F_{\text{corte}}$$

$$F_{\text{diseño}} = 2 (2160 \text{ N}) = 4320 \text{ N}$$

La cuchilla tiene un diámetro de 180 mm y considerando que el corte será efectuado por una cuchilla en cada eje, entonces el Torque será de:

$$T_{eje} = 2 \left(\frac{F_{diseño} \cdot d_{cuchilla}}{2} \right)$$

$$T_{eje} = 4320 \text{ N} (0.180 \text{ m}) = 777.60 \text{ Nm}$$

Ahora, la velocidad de rotación del eje es conocido, con ello se calculó la potencia de motor con la ecuación siguiente:

$$P_{motor} = T_{eje} \cdot n_{eje}$$

$$P_{motor} = 777.60 \text{ Nm} \left(\frac{80 \times 2\pi \text{ rad}}{60 \text{ s}} \right) = 6514.41 \text{ W}$$

$$P_{motor} = 6514.41 \text{ W} \left(\frac{1 \text{ HP}}{746 \text{ W}} \right) = 8.732 \text{ HP}$$

El motor eléctrico adecuado seleccionado tuvo una potencia de 10 HP, con una velocidad de rotación nominal de 885 rpm. Dicho dato servirá para el diseño del sistema de transmisión por engranajes de dientes rectos. El modelo seleccionado es el WEG W21 Prueba de Explosión High Efficiency 10 HP 8P 284T 3F 230/460/380 V 60 Hz IC411 - TEFC - Con pies. En el Anexo 7 se aprecia la ficha técnica del motor seleccionado.

$$P_{real\ motor} = 10 \text{ HP} \approx 7.46 \text{ kW}$$

4.2.6. Cálculo del sistema de transmisión por engranajes de dientes rectos

Calculando el factor de sobrecarga empleando la Tabla 7 Con el objetivo de determinar el valor tentativo del paso diametral. Empleando la potencia del motor eléctrico y la máquina a impulsar se tuvo que:

Tabla 7. Factores de sobrecarga sugeridos

Fuente de potencia	Máquina impulsada			
	Uniforme	Choque ligero	Choque moderado	Choque pesado
Uniforme	1.00	1.25	1.50	1.75
Choque ligero	1.20	1.40	1.75	2.25
Choque moderado	1.30	1.70	2.00	2.75

Fuente: (Mott, 2006)

El factor de sobrecarga considerando una fuente de potencia uniforme al ser motor eléctrico y la máquina impulsada es de choque ligero, fue de:

$$K_o = 1.25$$

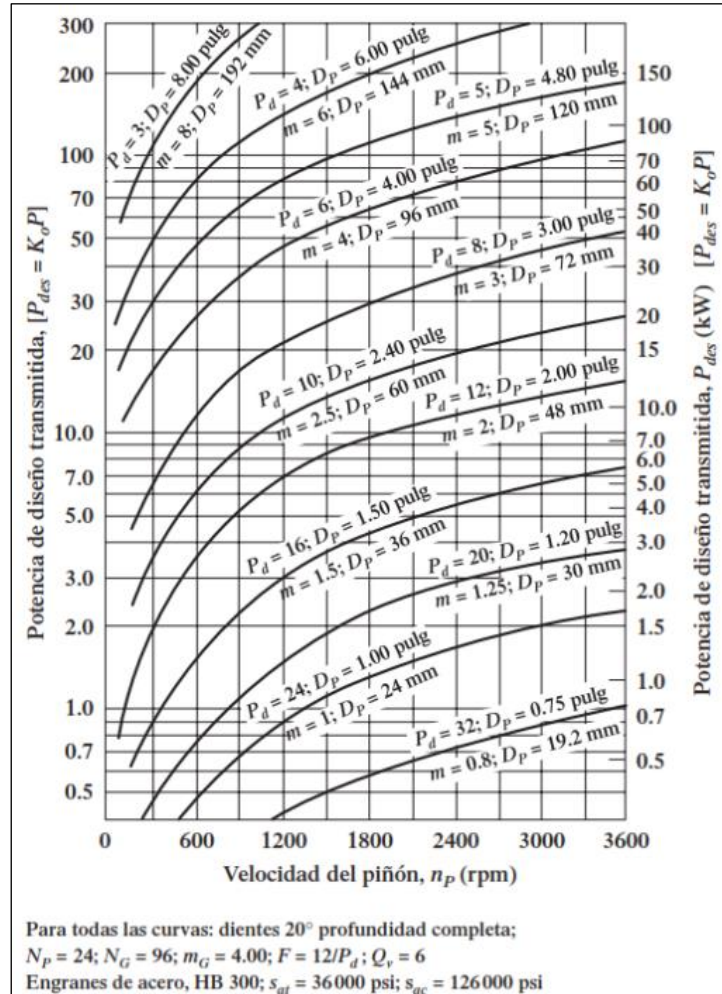
La potencia de diseño es:

$$P_{diseño} = K_o \times P_{real\ motor}$$

$$P_{diseño} = 1.25 \times 10\ HP = 12.5\ HP$$

Luego, de la Figura 25 se escogió un paso diametral de 6, para el diseño.

Figura 25. Gráfico para determinar el paso diametral



Fuente: (Mott, 2006)

Seleccionando un número de dientes para el piñón. Se consideró un piñón pequeño, por lo que se seleccionó 17 dientes.

$$N_p = 17\ \text{dientes}$$

Seguidamente, se calculó la relación de velocidad:

$$VR = \frac{n_{motor}}{n_{eje}}$$

$$VR = \frac{885 \text{ rpm}}{80 \text{ rpm}} = 11.063$$

Al ser muy elevada dicha relación de velocidad, se empleó un tren de engranajes con triple reducción de velocidad, entonces se tuvo lo siguiente:

$$R_t = \sqrt[3]{VR}$$

$$R_t = \sqrt[3]{11.063} = 2.228$$

$$VR_1 = VR_2 = VR_3 = 2.228$$

Se elaboró una tabla para determinar el número de dientes en los engranajes en cada reducción o etapa. Cabe precisar, que el eje debe tener una tolerancia sobre la velocidad de rotación, 80 rpm (± 5 rpm). Entonces, de la Tabla 8:

Tabla 8. Parámetros para diseño de engranajes de dientes rectos

Primera reducción				
N_P	N_G	Entero más cercano	VR real	Velocidad real de salida (rpm)
17	37.88	38	2.235	395.92
Segunda reducción				
17	37.88	38	2.235	177.12
Tercera reducción				
17	37.88	38	2.235	79.24

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, para el piñón se seleccionó 17 dientes y para los engranajes 38 dientes, con una relación de velocidad real de 2.235 y una velocidad real de rotación en el eje de 79.24 rpm.

Seguidamente, se calculó los pasos diametrales, distancia entre centros, velocidad de la línea de paso y la carga transmitida:

$$P_d = 6$$

$$N_P = 17 \text{ dientes}$$

$$N_G = 38 \text{ dientes}$$

$$D_P = \frac{N_P}{P_d}$$

$$D_P = \frac{17}{6} = 2.833 \text{ pulg} \approx 71.97 \text{ mm}$$

$$D_G = \frac{N_G}{P_d}$$

$$D_G = \frac{38}{6} = 6.333 \text{ pulg} \approx 160.87 \text{ mm}$$

$$C = \frac{(N_P + N_G)}{2 \times P_d}$$

$$C = \frac{(17 + 38)}{2 \times 6} = 4.583 \text{ pulg} \approx 116.42 \text{ mm}$$

$$v_t = \frac{\pi \times D_P \times n_{motor}}{12}$$

$$v_t = \frac{\pi \times 2.833 \times 885}{12} = 656.462 \frac{\text{pies}}{\text{min}}$$

Carga transmitida:

$$W_t = 33000 \times \frac{P_{real \ motor}}{v_t}$$

$$W_t = 33000 \times \frac{10}{656.462} = 502.695 \text{ lbf}$$

Ahora, el ancho de cara es:

$$F = \frac{12}{P_d}$$

$$F = \frac{12}{6} = 2 \text{ pulg} \approx 50.8 \text{ mm}$$

El material empleado para el piñón y engranaje es el Acero. De la Tabla 9 se seleccionó el valor para C_p , que es de:

$$C_p = 2300$$

Tabla 9. Coeficiente elástico, C_p

Material del piñón	Módulo de elasticidad, E_p , lb/pulg ² (MPa)	Material y módulo de elasticidad E_g , lb/pulg ² (MPa), del engrane					
		Acero 30×10^6 (2×10^5)	Hierro maleable 25×10^6 (1.7×10^5)	Hierro nodular 24×10^6 (1.7×10^5)	Hierro colado 22×10^6 (1.5×10^5)	Bronce de aluminio 17.5×10^6 (1.2×10^5)	Bronce de estaño 16×10^6 (1.1×10^5)
Acero	30×10^6 (2×10^5)	2300 (191)	2180 (181)	2160 (179)	2100 (174)	1950 (162)	1900 (158)
Hierro maleable	25×10^6 (1.7×10^5)	2180 (181)	2090 (174)	2070 (172)	2020 (168)	1900 (158)	1850 (154)
Hierro nodular	24×10^6 (1.7×10^5)	2160 (179)	2070 (172)	2050 (170)	2000 (166)	1880 (156)	1830 (152)
Hierro colado	22×10^6 (1.5×10^5)	2100 (174)	2020 (168)	2000 (166)	1960 (163)	1850 (154)	1800 (149)
Bronce de aluminio	17.5×10^6 (1.2×10^5)	1950 (162)	1900 (158)	1880 (156)	1850 (154)	1750 (145)	1700 (141)
Bronce de estaño	16×10^6 (1.1×10^5)	1900 (158)	1850 (154)	1830 (152)	1800 (149)	1700 (141)	1650 (137)

Fuente: Tomado de la norma AGMA 2001-C95: *Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth*, con autorización del editor, American Gear Manufacturers Association, 1500 King Street, Suite 201, Alexandria, VA 22314
Nota: Relación de Poisson = 0.30; unidades de C_p : (lb/pulg²)^{0.5} o (MPa)^{0.5}

Fuente: (Mott, 2006)

Se debe especificar el número de calidad Q_v , para lo cual se empleó la Tabla 10, considerando la velocidad de la línea de paso, por lo que el valor es de:

$$Q_v = 7$$

Tabla 10. Números de calidad AGMA recomendados

Aplicación	Número de calidad	Aplicación	Número de calidad
Accionamiento de tambor			
mezclador de cemento	3-5	Taladro pequeño	7-9
Horno de cemento	5-6	Lavadora de ropa	8-10
Impulsores de laminadoras de acero	5-6	Prensa de impresión	9-11
Cosechadora de granos	5-7	Mecanismo de cómputo	10-11
Grúas	5-7	Transmisión automotriz	10-11
Prensas de punzonado	5-7	Accionamiento de antena de radar	10-12
Transportador de mina	5-7	Accionamiento de propulsión marina	10-12
Máquina para fabricar cajas de papel	6-8	Accionamiento de motor de avión	10-13
Mecanismo de medidores de gas	7-9	Giroscopio	12-14
Accionamientos de máquinas herramienta y de otros sistemas mecánicos de alta calidad			
Velocidad de la línea de paso (pies/min)	Número de calidad		Velocidad de la línea de paso
0-800	6-8		0-4
800-2000	8-10		4-11
2000-4000	10-12		11-22
Más de 4000	12-14		Más de 22

Fuente: (Mott, 2006)

Se determinó el factor dinámico empleando la Figura 26, y empleando las ecuaciones respectivas se obtuvo dicho factor de la siguiente manera:

$$B = \frac{(12 - Q_v)^{0.667}}{4}$$

$$B = \frac{(12 - 7)^{0.667}}{4} = 0.731$$

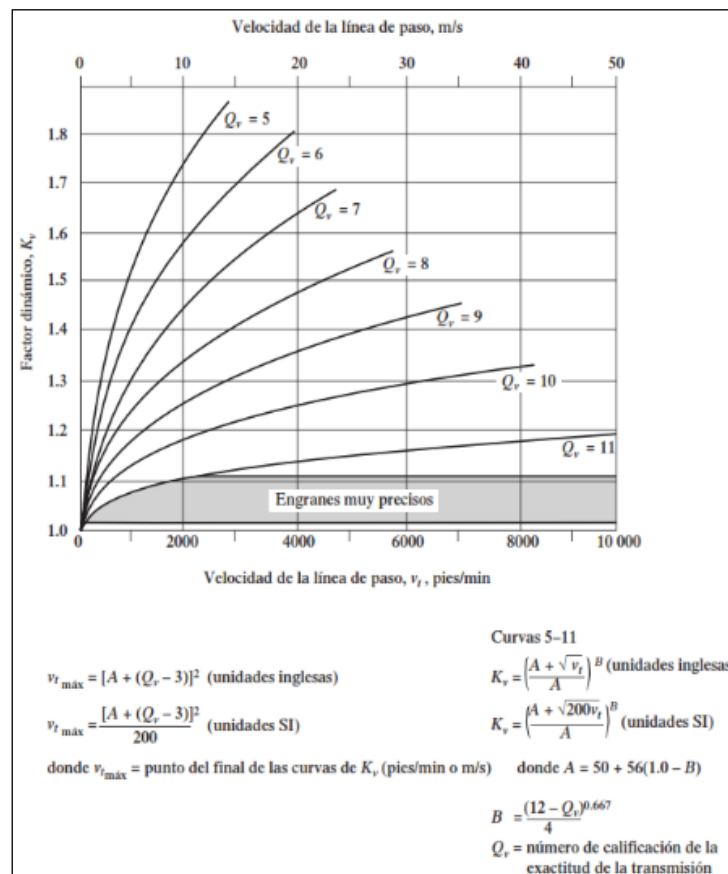
$$A = 50 + 56(1 - B)$$

$$A = 50 + 56(1 - 0.731) = 65.042$$

$$K_v = \left(\frac{A + \sqrt{v_t}}{A} \right)^B$$

$$K_v = \left(\frac{65.042 + \sqrt{656.462}}{65.042} \right)^{0.731} = 1.275$$

Figura 26. Factor dinámico, K_v



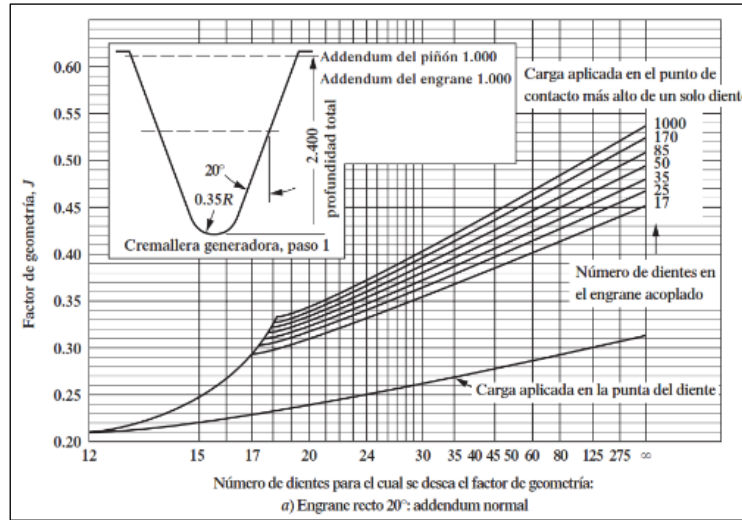
Fuente: (Mott, 2006)

Se debe especificar la forma de los dientes, los factores geométricos para flexión del piñón y del engrane se determinaron con el uso de la Figura 27, entonces se tuvo lo siguiente:

$$J_P = 0.295$$

$$J_G = 0.375$$

Figura 27. Factor J de geometría

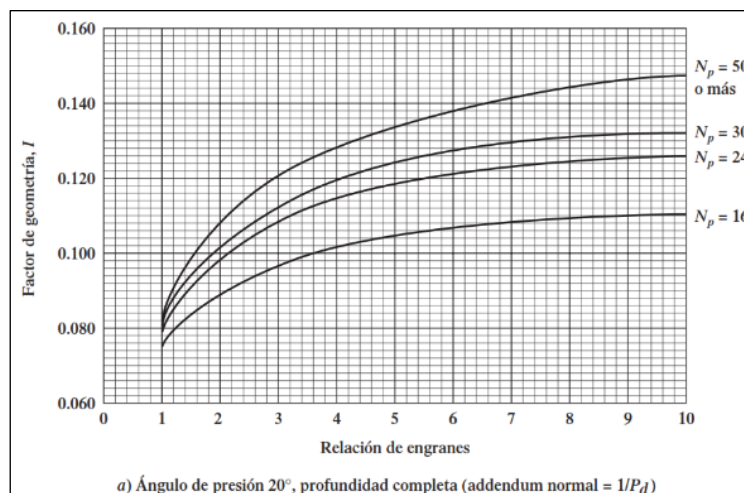


Fuente: (Mott, 2006)

Luego el factor de geometría para picadura se determinó con la Figura 28, considerando que el engranaje de dientes rectos tiene 20° , se tuvo lo siguiente:

$$I = 0.09$$

Figura 28. Factor de geometría I para piñones rectos externos



Fuente: (Mott, 2006)

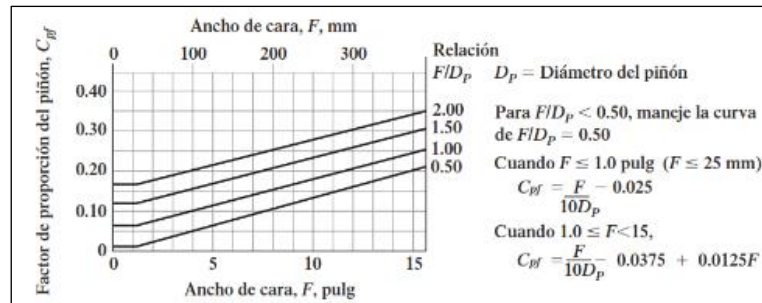
Se calculó el factor de distribución de carga K_m , empleando Figura 29 y Figura 30, considerando unidades comerciales cerradas de engranes, obteniendo lo siguiente:

$$\frac{F}{D_p} = \frac{2 \text{ pulg}}{2.833 \text{ pulg}} = 0.706$$

$$C_{pf} = \frac{F}{10 D_p} - 0.0375 + 0.0125 F$$

$$C_{pf} = \frac{2 \text{ pulg}}{10 \times 2.833 \text{ pulg}} - 0.0375 + 0.0125 \times 2 \text{ pulg} = 0.058$$

Figura 29. Factor de proporción, C_{pf}

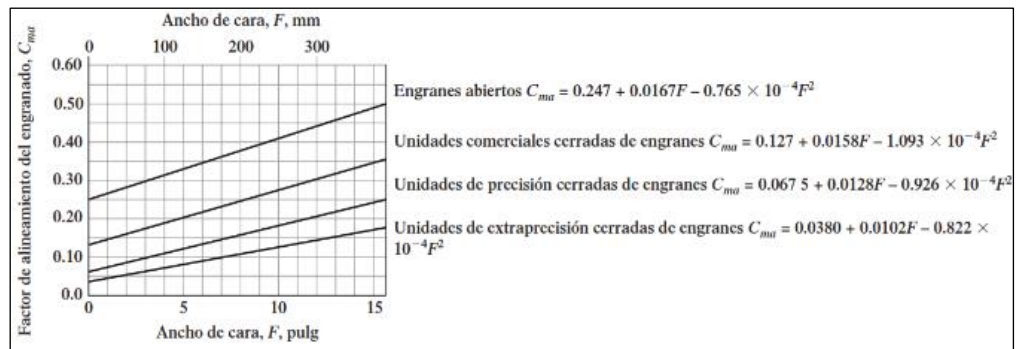


Fuente: (Mott, 2006)

$$C_{ma} = 0.127 + 0.0158 F - 1.093 \times 10^{-4} F^2$$

$$C_{ma} = 0.127 + 0.0158 \times 2 \text{ pulg} - 1.093 \times 10^{-4} (2 \text{ pulg})^2 = 0.158$$

Figura 30. Factor de alineamiento del engranado,



Fuente: (Mott, 2006)

Donde el factor de distribución de carga K_m , fue de:

$$K_m = 1 + C_{pf} + C_{ma}$$

$$K_m = 1 + 0.068 + 0.158 = 1.216$$

El factor de tamaño K_S , se calculó mediante la Tabla 11, ya que el paso diametral es de 6, mayor a 5, dicho factor es:

$$K_S = 1$$

Tabla 11. Factores de tamaño sugeridos, K_s

Paso diametral, P_d	Módulo métrico, m	Factor de tamaño, K_s
≥ 5	≤ 5	1.00
4	6	1.05
3	8	1.15
2	12	1.25
1.25	20	1.40

Fuente: (Mott, 2006)

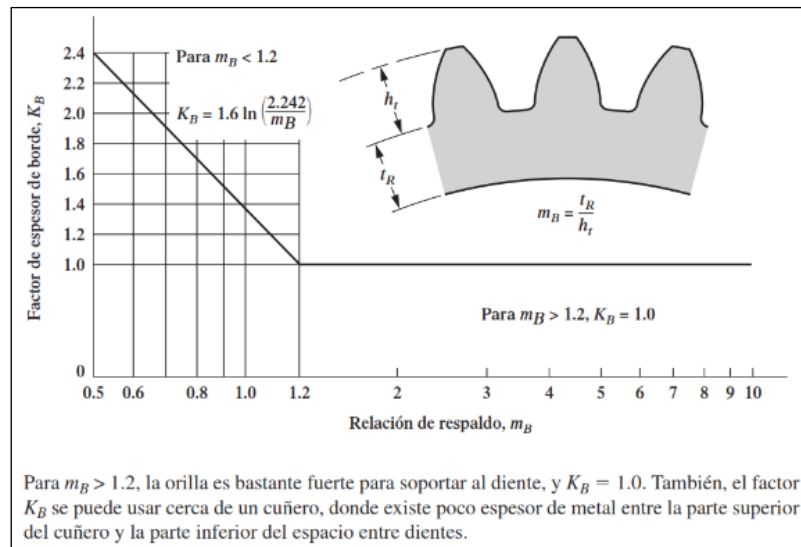
Especificando el factor de espesor K_B , donde se ha considerado que:

$$m_B = \frac{t_R}{h_t}$$

Donde $m_B > 1.2$, para que la orilla sea lo bastante fuerte para resistir al diente. Por lo tanto:

$$K_B = 1$$

Figura 31. Factor de espesor de borde, K_B



Fuente: (Mott, 2006)

Luego, el factor de servicio recomendado por Mott (2006), varía de 1 a 1.5, por lo que se escogió un factor de 1.2 para no sobredimensionar los engranajes pero para darle una seguridad adecuada al diseño del mecanismo triturador, por lo tanto:

$$SF = 1.2$$

El factor de relación de dureza se obtiene del material empleado en el engrane y piñón, pero como el material empleado para ambos es el

mismo, el factor es de:

$$C_H = 1$$

El factor para la confiabilidad, considerando una confiabilidad del 99%, empleando la Tabla 12. Factor de confiabilidad, Tabla 12, es de:

$$K_R = 1$$

Tabla 12. Factor de confiabilidad, K_R

Confiabilidad	K_R
0.90, una falla en 10	0.85
0.99, una falla en 100	1.00
0.999, una falla en 1000	1.25
0.9999, una falla en 10 000	1.50

Fuente: (Mott, 2006)

Se determinó la vida para el diseño, donde se determinó el número de ciclos de carga para el sistema de transmisión por piñón y engrane. Los factores de esfuerzo por número de ciclos debido a la flexión y de picadura, para piñón y engrane. La vida útil del del mecanismo triturador es de 96360 horas, de acuerdo a lo calculado anteriormente. Por lo tanto, los números de carga para cada piñón y engrane en cada etapa son:

$$V_e = 96360 \text{ h}$$

$$q = 1$$

$$N_{CP1} = 60 \times V_e \times n_{P1} \times q$$

$$N_{CG1} = 60 \times V_e \times n_{G1} \times q$$

$$N_{CP1} = 60 \times 96360 \times 885 \times 1$$

$$N_{CG1} = 60 \times 96360 \times 395.973 \times 1$$

$$N_{CP1} = 5.117 \times 10^9$$

$$N_{CG1} = 2.289 \times 10^9$$

$$N_{CP2} = 60 \times V_e \times n_{P2} \times q$$

$$N_{CG2} = 60 \times V_e \times n_{G2} \times q$$

$$N_{CP2} = 60 \times 96360 \times 395.973 \times 1$$

$$N_{CG2} = 60 \times 96360 \times 177.169 \times 1$$

$$N_{CP2} = 2.289 \times 10^9$$

$$N_{CG2} = 1.024 \times 10^9$$

$$N_{CP3} = 60 \times V_e \times n_{P3} \times q$$

$$N_{CG3} = 60 \times V_e \times n_{G3} \times q$$

$$N_{CP3} = 60 \times 96360 \times 177.169 \times 1$$

$$N_{CG3} = 60 \times 96360 \times 79.27 \times 1$$

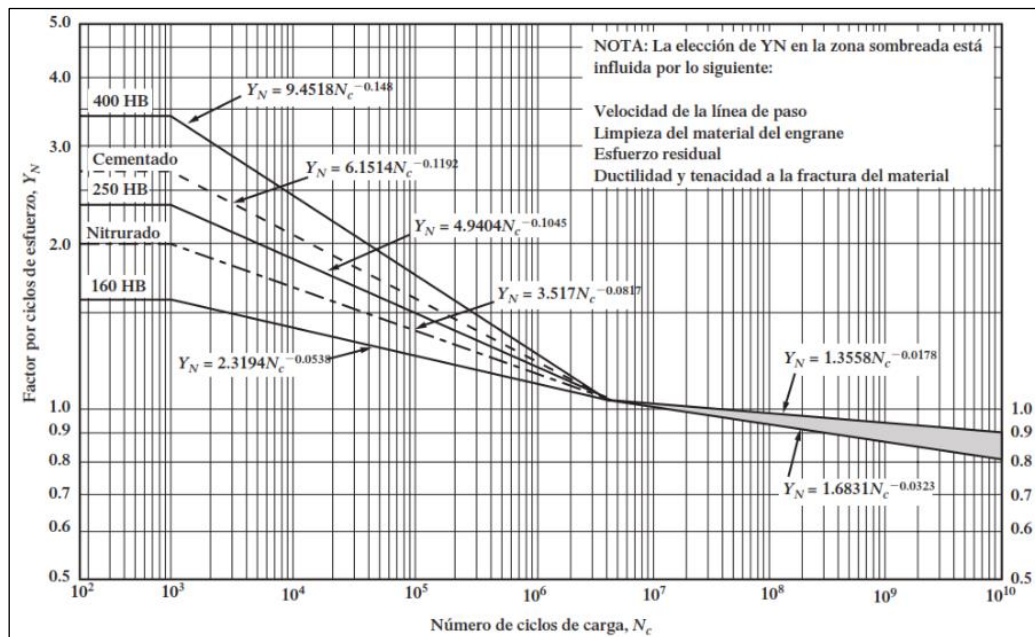
$$N_{CP3} = 1.024 \times 10^9$$

$$N_{CG3} = 4.583 \times 10^8$$

Con dichos valores de carga calculados, empleando la Figura 32, se determinó los factores de resistencia flexionante por ciclos de esfuerzo. Entonces, se obtuvo lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 Y_{NP1} &= 1.3558 N_{CP1}^{-0.0178} & Y_{NG1} &= 1.3558 N_{CG1}^{-0.0178} \\
 Y_{NP1} &= 1.3558 (5.117 \times 10^9)^{-0.0178} & Y_{NG1} &= 1.3558 (2.289 \times 10^9)^{-0.0178} \\
 Y_{NP1} &= 0.911 & Y_{NG1} &= 0.924 \\
 Y_{NP2} &= 1.3558 N_{CP2}^{-0.0178} & Y_{NG2} &= 1.3558 N_{CG2}^{-0.0178} \\
 Y_{NP2} &= 1.3558 (2.289 \times 10^9)^{-0.0178} & Y_{NG2} &= 1.3558 (1.024 \times 10^9)^{-0.0178} \\
 Y_{NP2} &= 0.924 & Y_{NG2} &= 0.937 \\
 Y_{NP3} &= 1.3558 N_{CP3}^{-0.0178} & Y_{NG3} &= 1.3558 N_{CG3}^{-0.0178} \\
 Y_{NP3} &= 1.3558 (1.024 \times 10^9)^{-0.0178} & Y_{NG3} &= 1.3558 (4.583 \times 10^8)^{-0.0178} \\
 Y_{NP3} &= 0.937 & Y_{NG3} &= 0.951
 \end{aligned}$$

Figura 32. Factor de resistencia flexionante por ciclos de esfuerzo, Y_N



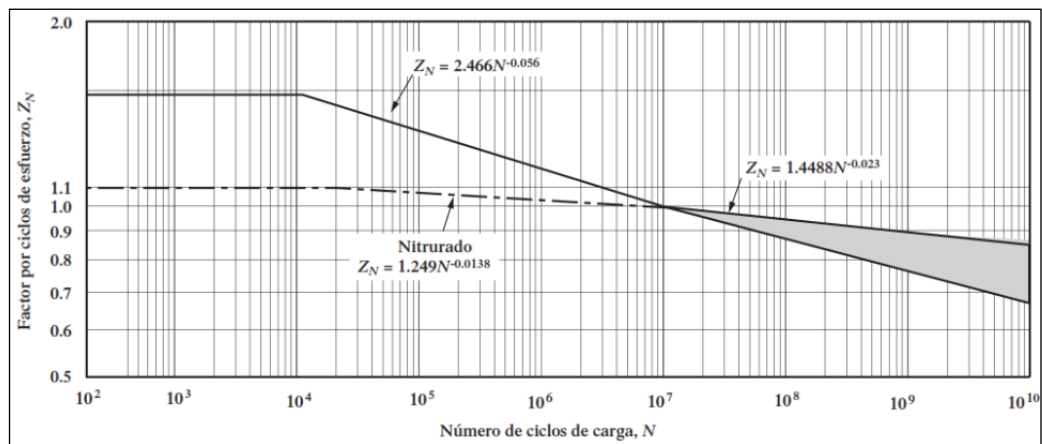
Fuente: (Mott, 2006)

Con la Figura 33 se calculó el factor de resistencia a la picadura en función de los ciclos de esfuerzo para cada piñón y engrane, donde se obtuvo lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 Z_{NP1} &= 1.4488 N_{CP1}^{-0.023} & Z_{NG1} &= 1.4488 N_{CG1}^{-0.023}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z_{NP1} &= 1.4488 (5.117 \times 10^9)^{-0.023} & Z_{NG1} &= 1.4488 (2.289 \times 10^9)^{-0.023} \\
Y_{NP1} &= 0.866 & Y_{NG1} &= 0.883 \\
Z_{NP2} &= 1.4488 N_{CP2}^{-0.023} & Z_{NG2} &= 1.4488 N_{CG2}^{-0.023} \\
Z_{NP2} &= 1.4488 (2.289 \times 10^9)^{-0.023} & Z_{NG2} &= 1.4488 (1.024 \times 10^9)^{-0.023} \\
Z_{NP2} &= 0.883 & Z_{NG2} &= 0.899 \\
Z_{NP3} &= 1.4488 N_{CP3}^{-0.023} & Z_{NG3} &= 1.4488 N_{CG3}^{-0.023} \\
Z_{NP3} &= 1.4488 (1.024 \times 10^9)^{-0.023} & Z_{NG3} &= 1.4488 (4.583 \times 10^8)^{-0.023} \\
Z_{NP3} &= 0.899 & Z_{NG3} &= 0.916
\end{aligned}$$

Figura 33. Factor de resistencia a la picadura por ciclos de esfuerzo, Z_N



Fuente: (Mott, 2006)

Ahora, se calculó los esfuerzos flexionantes en el piñón y engrane, por lo que se obtuvo lo siguiente:

$$S_{tP1} = \frac{W_t \times P_d}{F \times J_P} \times K_o \times K_S \times K_m \times K_B \times K_V$$

$$S_{tP1} = \frac{502.695 \times 6}{2 \times 0.29} \times 1.25 \times 1 \times 1.216 \times 1 \times 1.275 = 10080 \text{ psi} \approx 69.499 \text{ MPa}$$

$$S_{tG1} = S_{tP1} \left(\frac{J_P}{J_G} \right)$$

$$S_{tG1} = 13816 \text{ psi} \left(\frac{0.29}{0.37} \right) = 7900 \text{ psi} \approx 54.472 \text{ MPa}$$

Seguidamente, se ajustaron los esfuerzos flexionantes, empleando la ecuación siguiente:

$$S_{atP1} = S_{tP1} x \frac{K_R x SF}{Y_{NP1}}$$

$$S_{atP1} = 10080 \text{ psi} x \frac{1 x 1.2}{0.911} = 13282 \text{ psi} \approx 91.576 \text{ MPa}$$

$$S_{atG1} = S_{tG1} x \frac{K_R x SF}{Y_{NG1}}$$

$$S_{atG1} = 7900 \text{ psi} x \frac{1 x 1.2}{0.924} = 10262 \text{ psi} \approx 70.756 \text{ MPa}$$

Los esfuerzos de contactos calculados en el piñón y en el engrane de la primera etapa, ya que es donde se concentran los máximos esfuerzos de contacto, son:

$$S_{c1} = C_p x \sqrt{\frac{W_t x K_o x K_s x K_m x K_v}{F x D_p x l}}$$

$$S_{c1} = 2300 \text{ psi} x \sqrt{\frac{502.695 x 1.25 x 1 x 1.216 x 1.275}{2 x 2.833 x 0.09}} = 100533 \text{ psi} \approx 693.152 \text{ MPa}$$

Posteriormente, se ajustaron los esfuerzos de contacto en el piñón y engrane de la primer etapa, donde se obtuvo los siguiente:

$$S_{acP1} = S_{c1} x \frac{K_R x SF}{Z_{NP1}}$$

$$S_{acP1} = 100533 \text{ psi} x \frac{1 x 1.2}{0.866} = 139248 \text{ psi} \approx 960.082 \text{ MPa}$$

$$S_{acG1} = S_{c1} x \frac{K_R x SF}{Z_{NG1}}$$

$$S_{acG1} = 100533 \text{ psi} x \frac{1 x 1.2}{0.883} = 136696 \text{ psi} \approx 942.486 \text{ MPa}$$

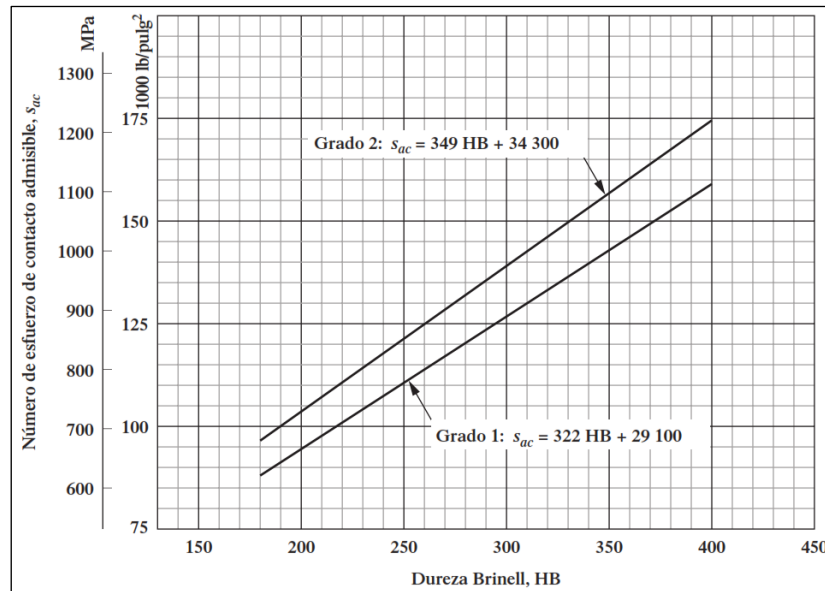
De la Figura 34 se empleó la fórmula para determinar la dureza Brinell, para acero grado 2, donde se obtuvo lo siguiente:

$$HB = (S_{acP1} - 29100) x \frac{1}{322}$$

$$HB = (139248 - 29100) x \frac{1}{322} = 342.075$$

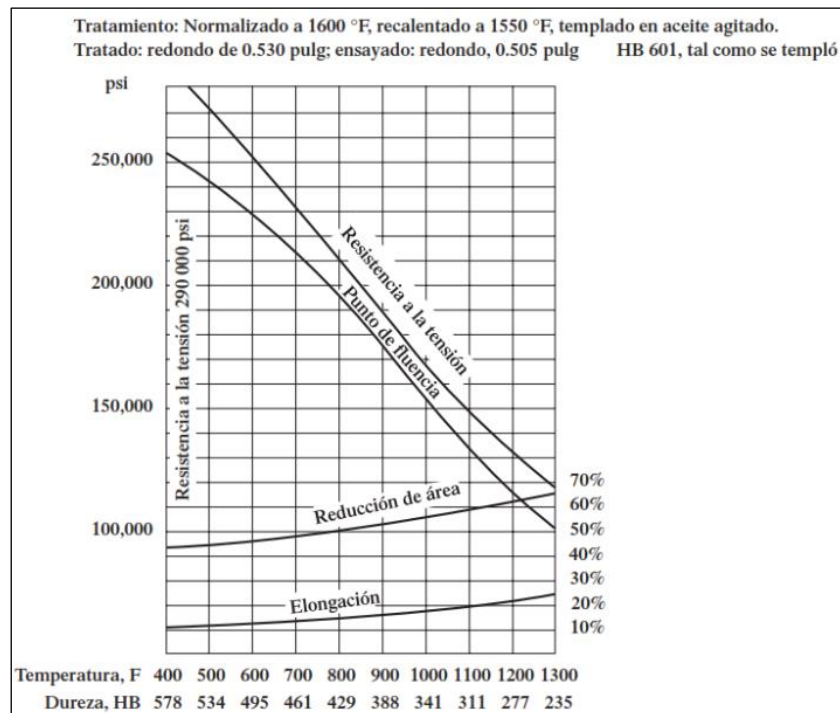
De acuerdo con lo calculado, se seleccionó un acero AISI 4140 grado 2, con una dureza Brinell de HB 388. Donde el esfuerzo de contacto para dicha dureza es de 154036 psi o equivalente a 1062.041 MPa, cumpliendo con lo requerido, ya que sobrepasa el esfuerzo de contacto esperado en el piñón más crítico en la primera etapa.

Figura 34. Número de esfuerzo de contacto admisible, S_{ac}



Fuente: (Mott, 2006)

Figura 35. Propiedades del acero AISI 4140



Fuente: (Mott, 2006)

4.3. Modelado de los elementos de máquina del mecanismo triturador

El modelado de cada elemento se realizó empleando el software SolidWorks 2018, donde la finalidad es determinar los esfuerzos, desplazamientos y factores de seguridad para cada elemento, en consideración con los materiales seleccionados. Para lo cual se hizo un análisis estático para poder determinar lo antes mencionado y poder concluir si es correcto el modelado o si es necesario reforzar el elemento o cambiar de material o aumentar sus dimensiones.

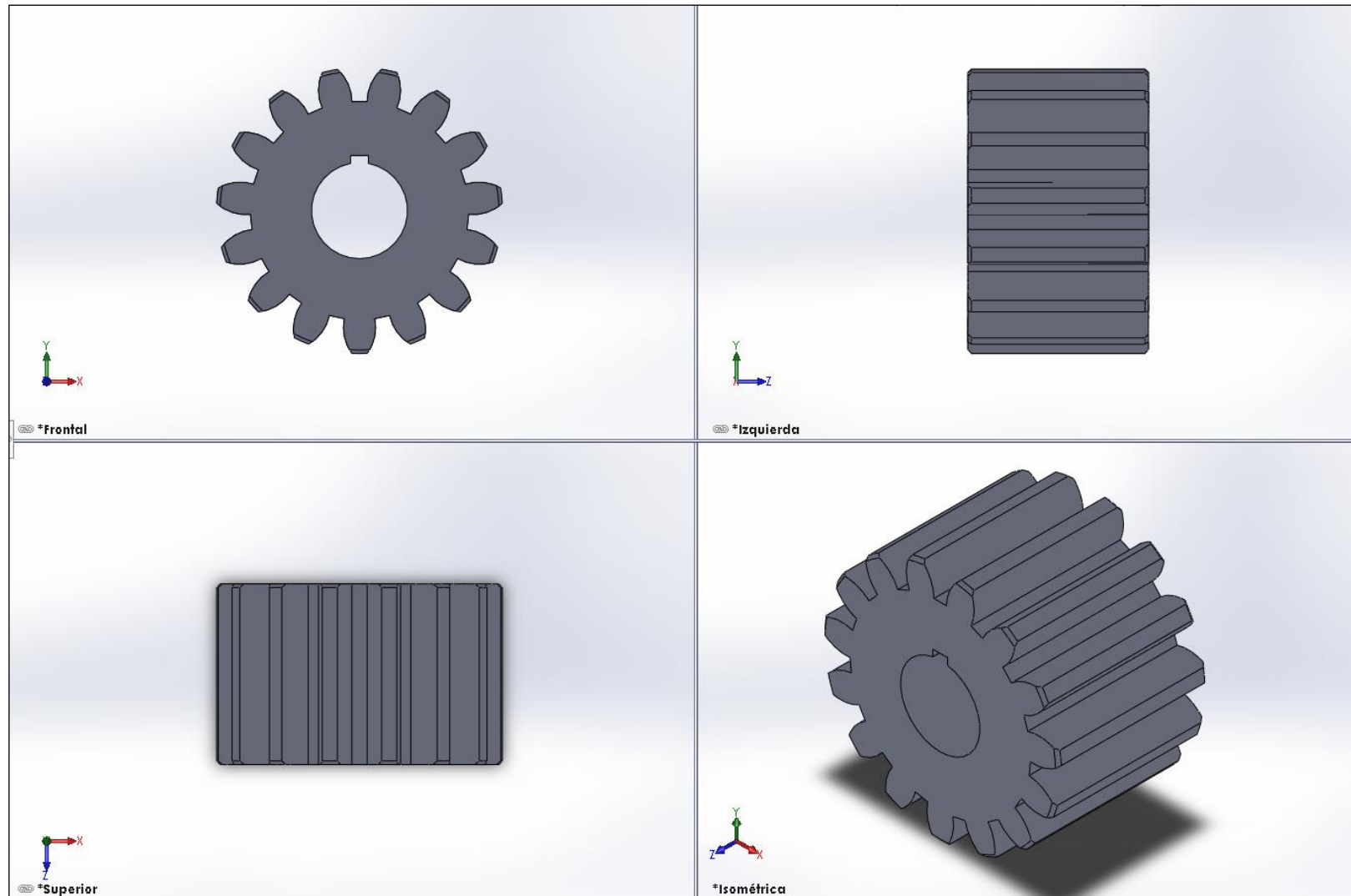
4.3.1. Sistema de transmisión de dientes rectos

Una vez que se determinó las medidas para los piñones y engranes de las 3 etapas de reducción en el sistema de transmisión por engranajes de dientes rectos, se procedió a modelarlos en SolidWorks.

La Figura 36 muestra el modelado del piñón de 17 dientes rectos, con sus vistas respectivas para una mejor visualización. En el Anexo 8 se puede observar el plano para el piñón de 17 dientes.

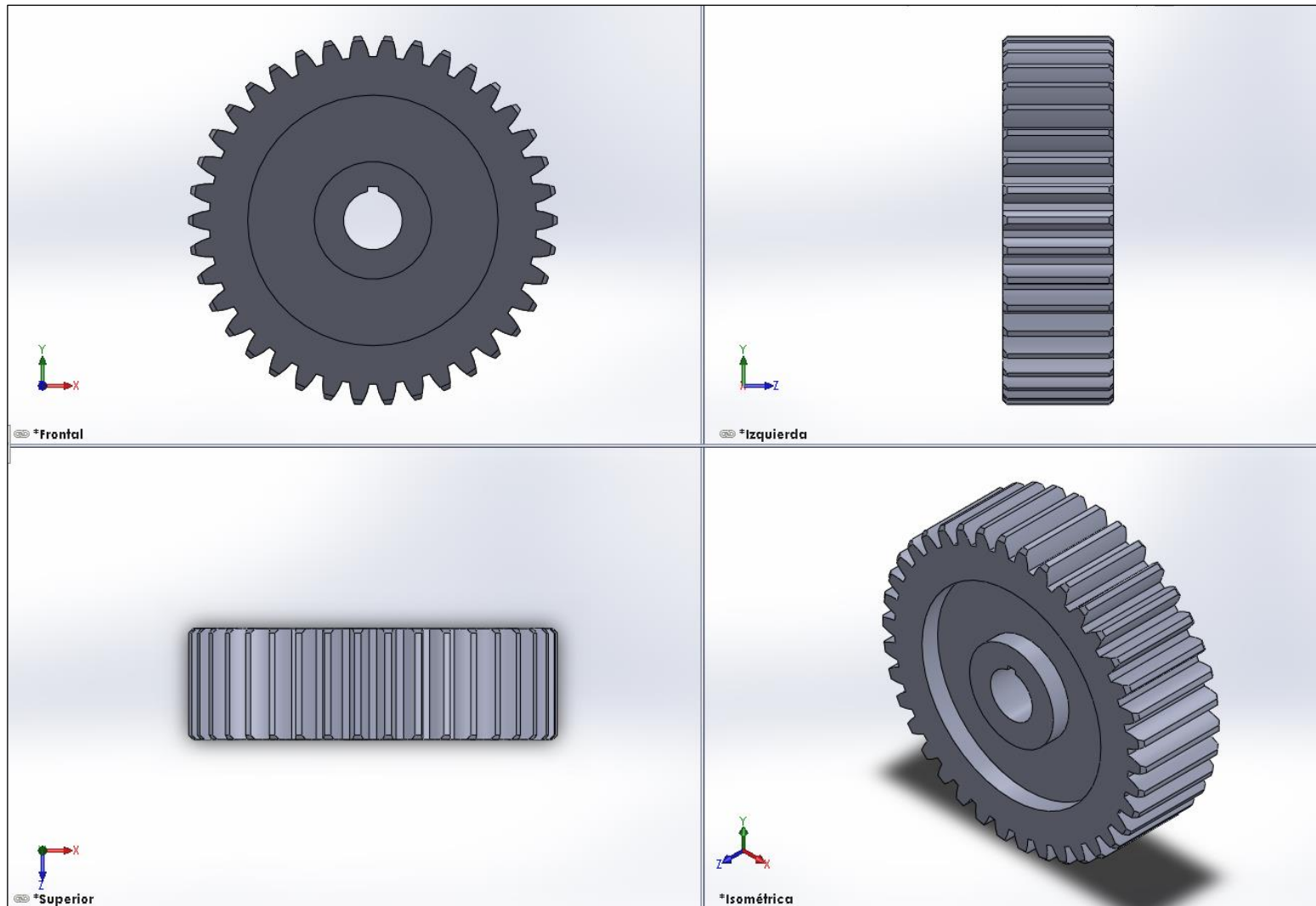
En la Figura 37 se puede observar el modelado para el engrane de 38 dientes con sus vistas respectivas. En el Anexo 9 se puede apreciar el plano para el engrane de 38 dientes.

Figura 36. Modelado de piñón de 17 dientes



Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

Figura 37. Modelado de engrane de 38 dientes



Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

4.3.2. Modelado de la base para mecanismo triturador

La base es de acero A500, empleando tubo cuadrado de 40mmx40mmx3mm, para que cumpla en el ámbito estructural soportando las cargas debido al peso propio de los elementos de máquina del mecanismo triturador, como son la caja portacuchillas, caja reductora de engranajes de dientes rectos, motor, tolva, y demás accesorios que conforman el mecanismo en mención.

En la Figura 38 se observa la vista isométrica del modelado de la base para el mecanismo triturador.

En la Figura 39 se observan todas las vistas respectivas de la base para el mecanismo triturador.

En la Figura 40 se observan los esfuerzos de Von Mises que se obtuvieron del análisis estático a la base del mecanismo triturador, donde el máximo esfuerzo encontrado fue de 77.71 MPa, muy inferior a lo que puede resistir el material empleado que es el acero A36.

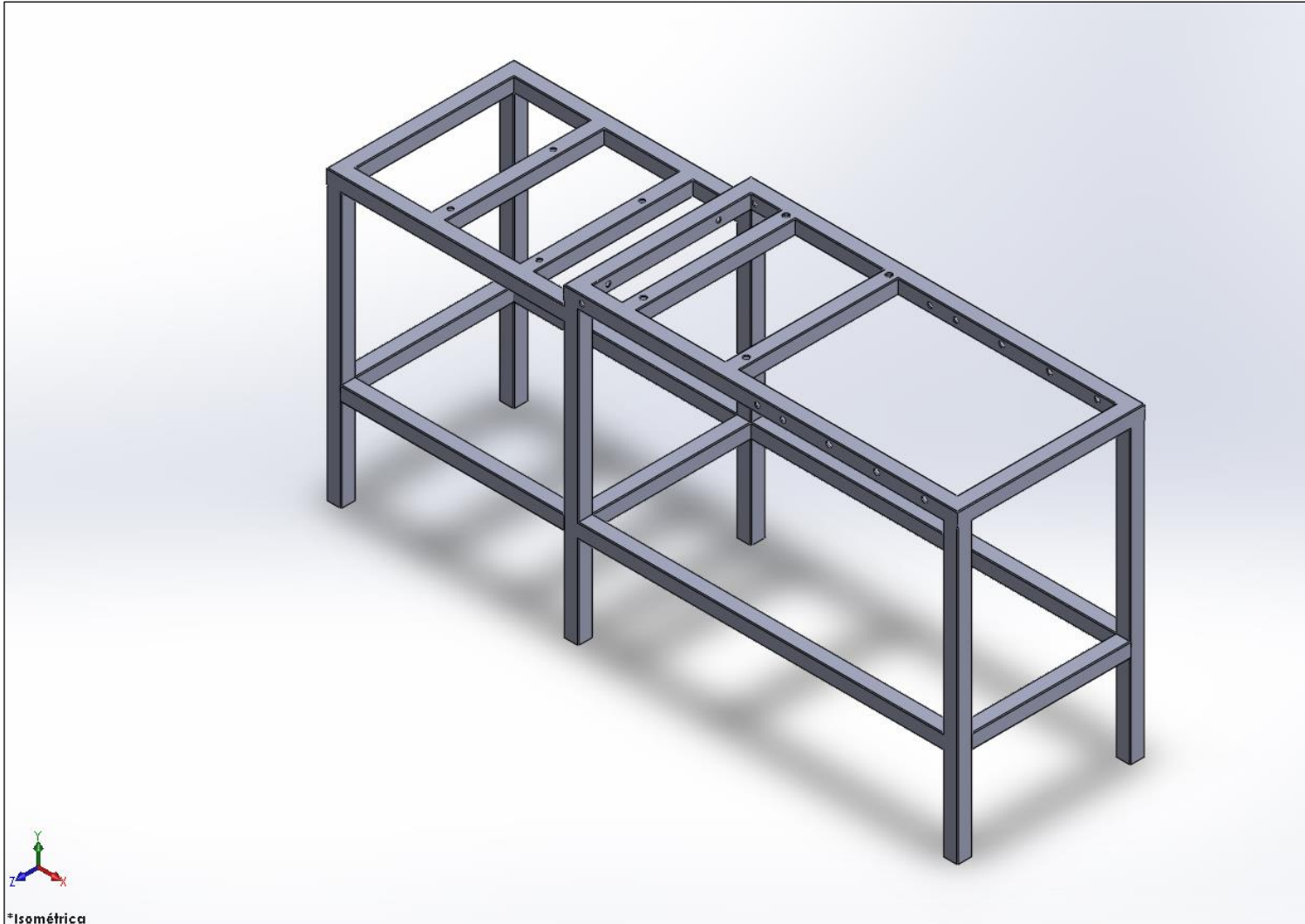
En la Figura 41 se observan los desplazamientos o deformaciones obtenidas del análisis estático para la base del mecanismo triturador, donde el máximo fue de 0.3313 mm, totalmente imperceptible, considerando una escala de deformación de 518.831.

En la Figura 42 se observa lo anteriormente mencionado, pero con una escala de deformación de 1, como se daría en la realidad.

En la Figura 43 se observa el mínimo factor de seguridad obtenido, siendo de 3.217, que en consideración con Juvinall & Marshek (2013), es un valor adecuado para el tipo de estructura y cargas empleadas.

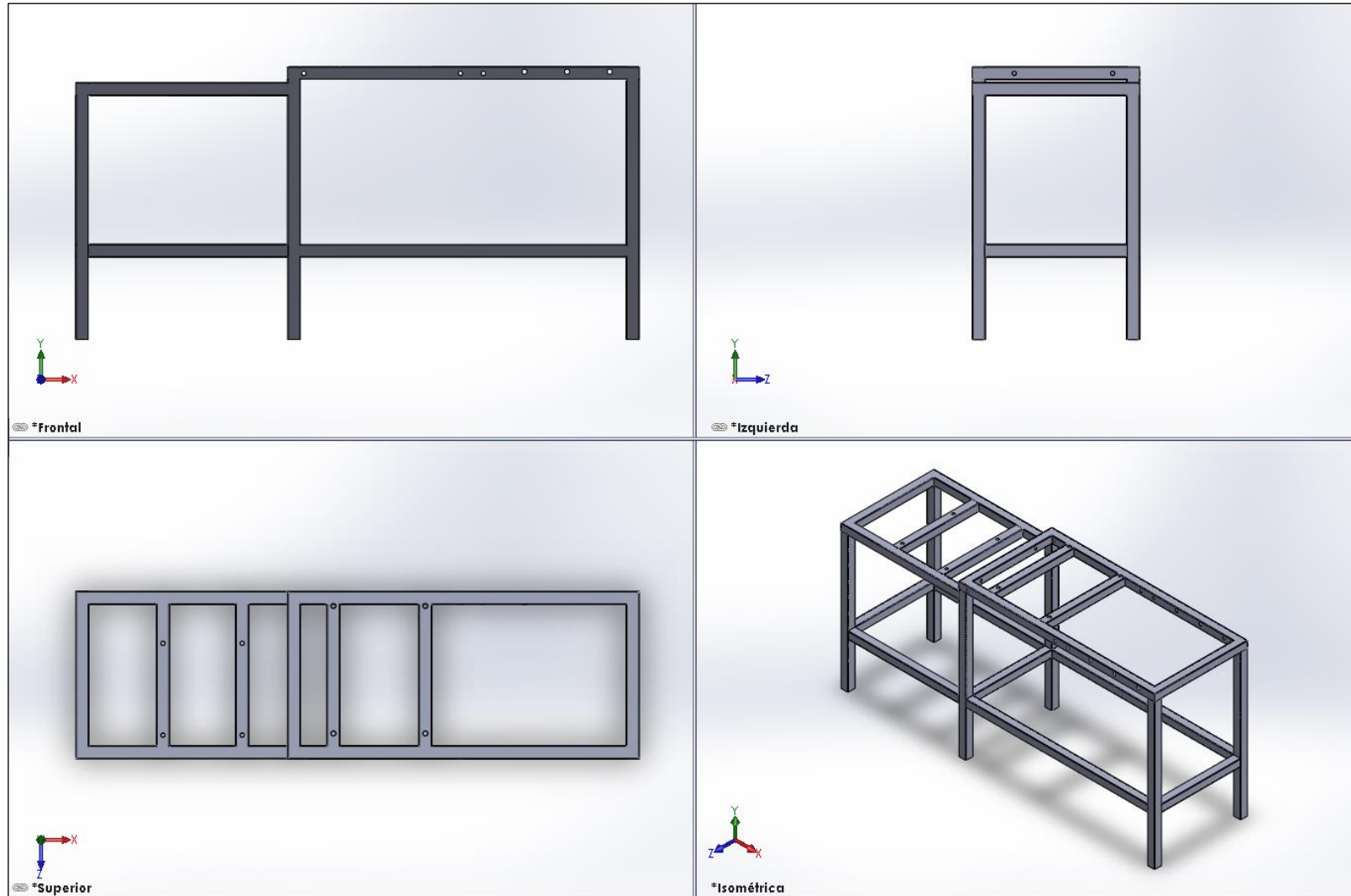
En el Anexo 10 se puede apreciar el plano de la base mencionada.

Figura 38. Vista isométrica de la base para mecanismo triturador



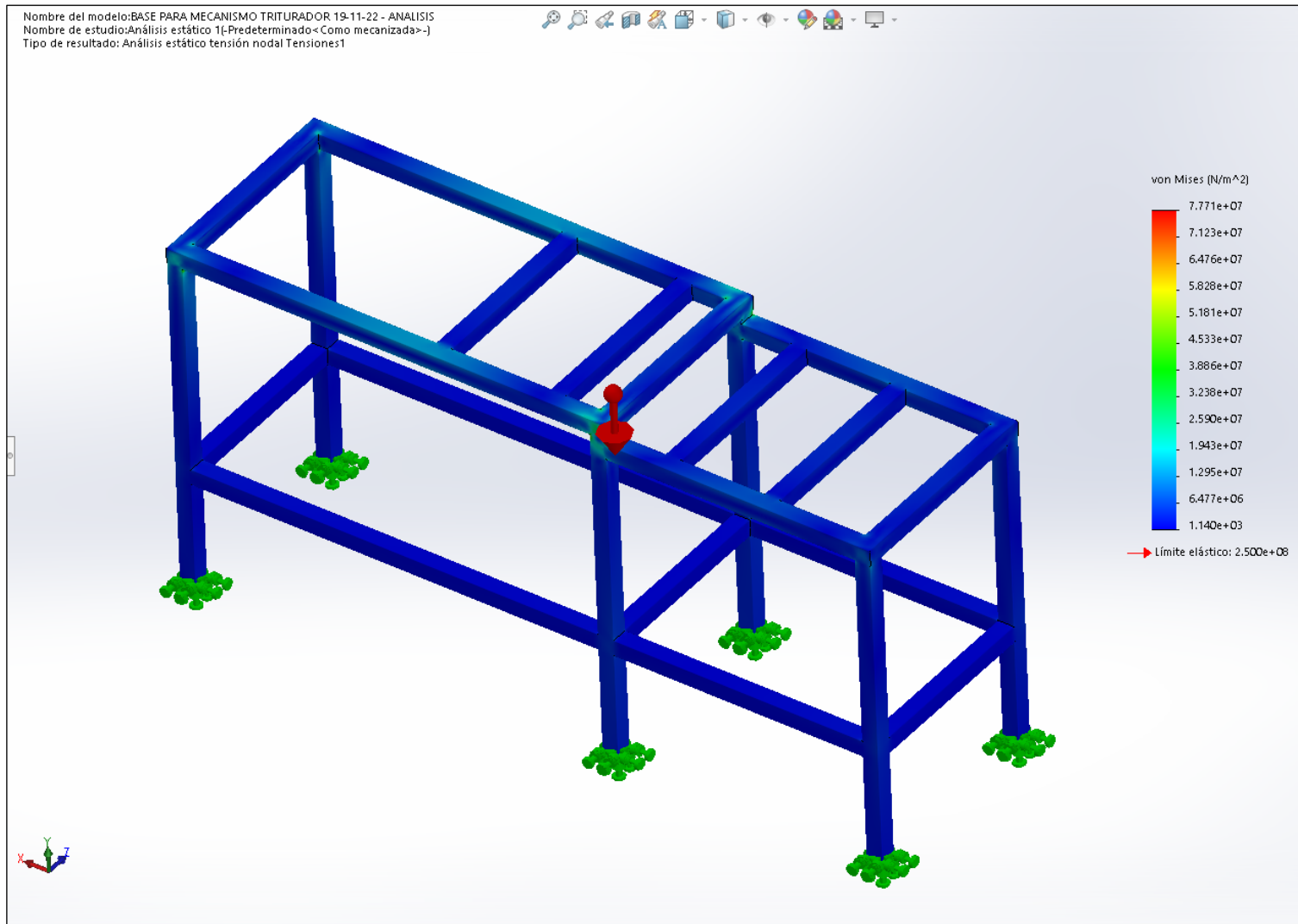
Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

Figura 39. Vistas respectivas de la base para mecanismo triturador



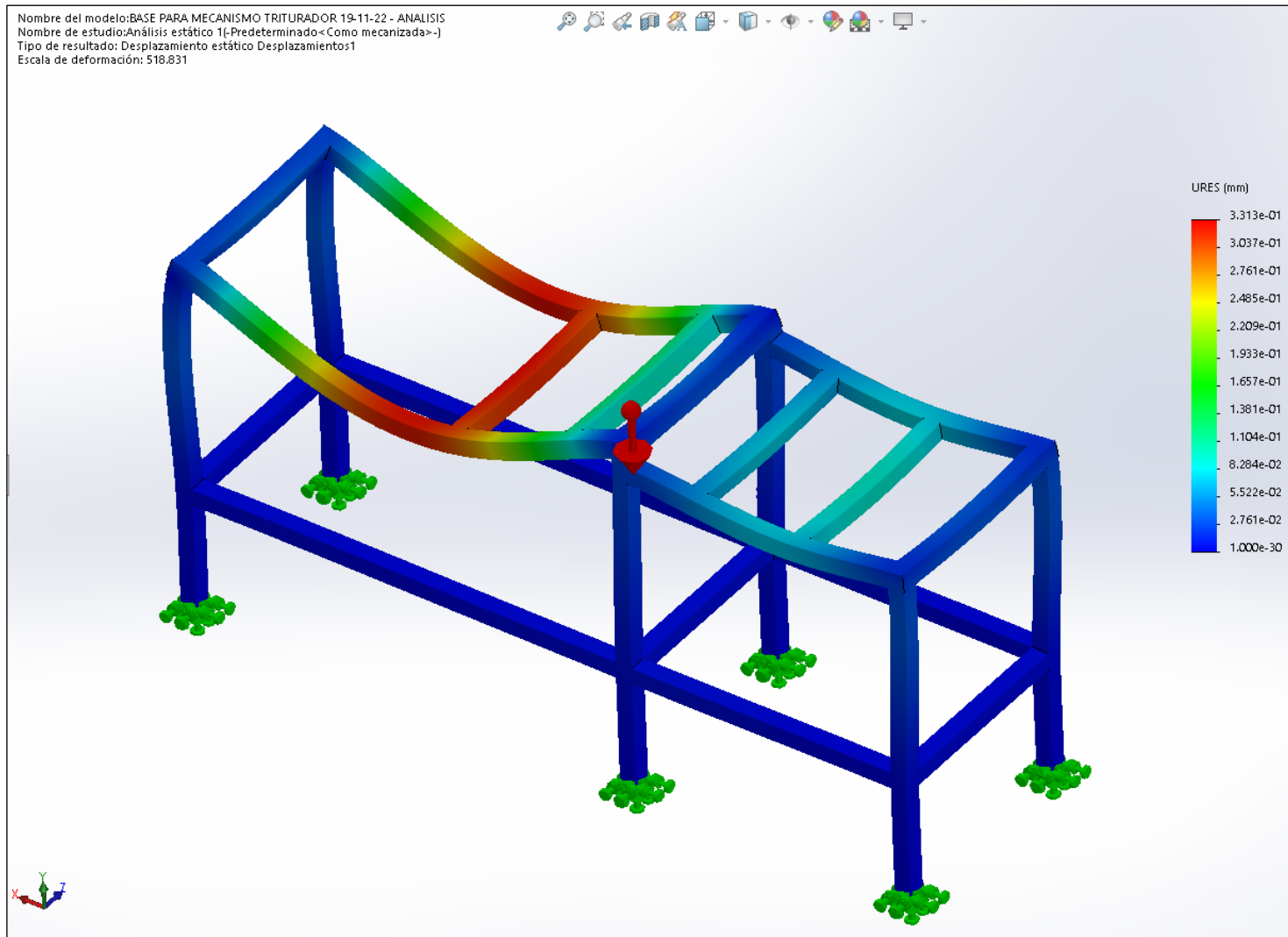
Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

Figura 40. Esfuerzos de Von Mises obtenidos del análisis estático en base



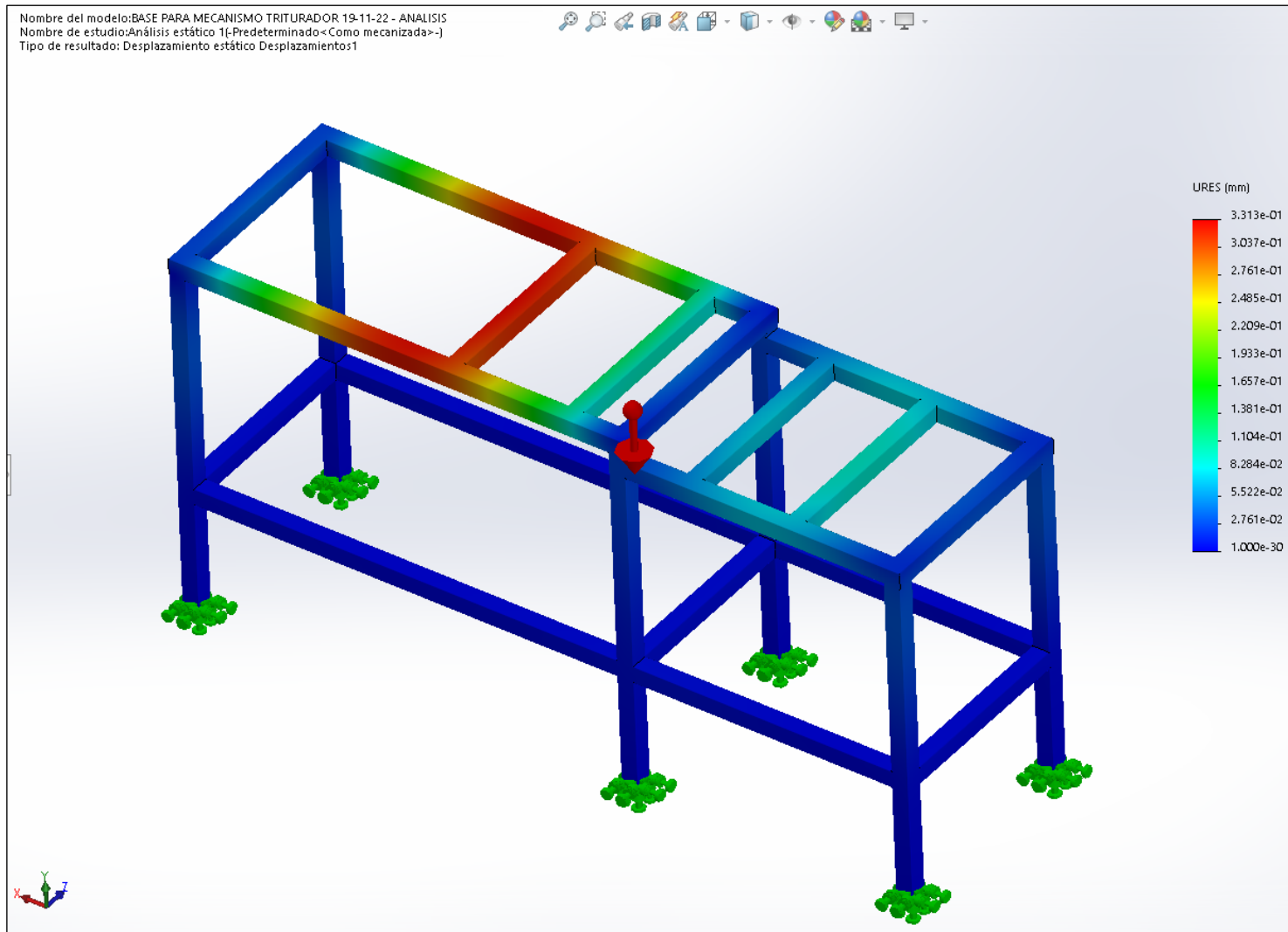
Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

Figura 41. Deformaciones obtenidas del análisis para la base (Escala de deformación=518.831)



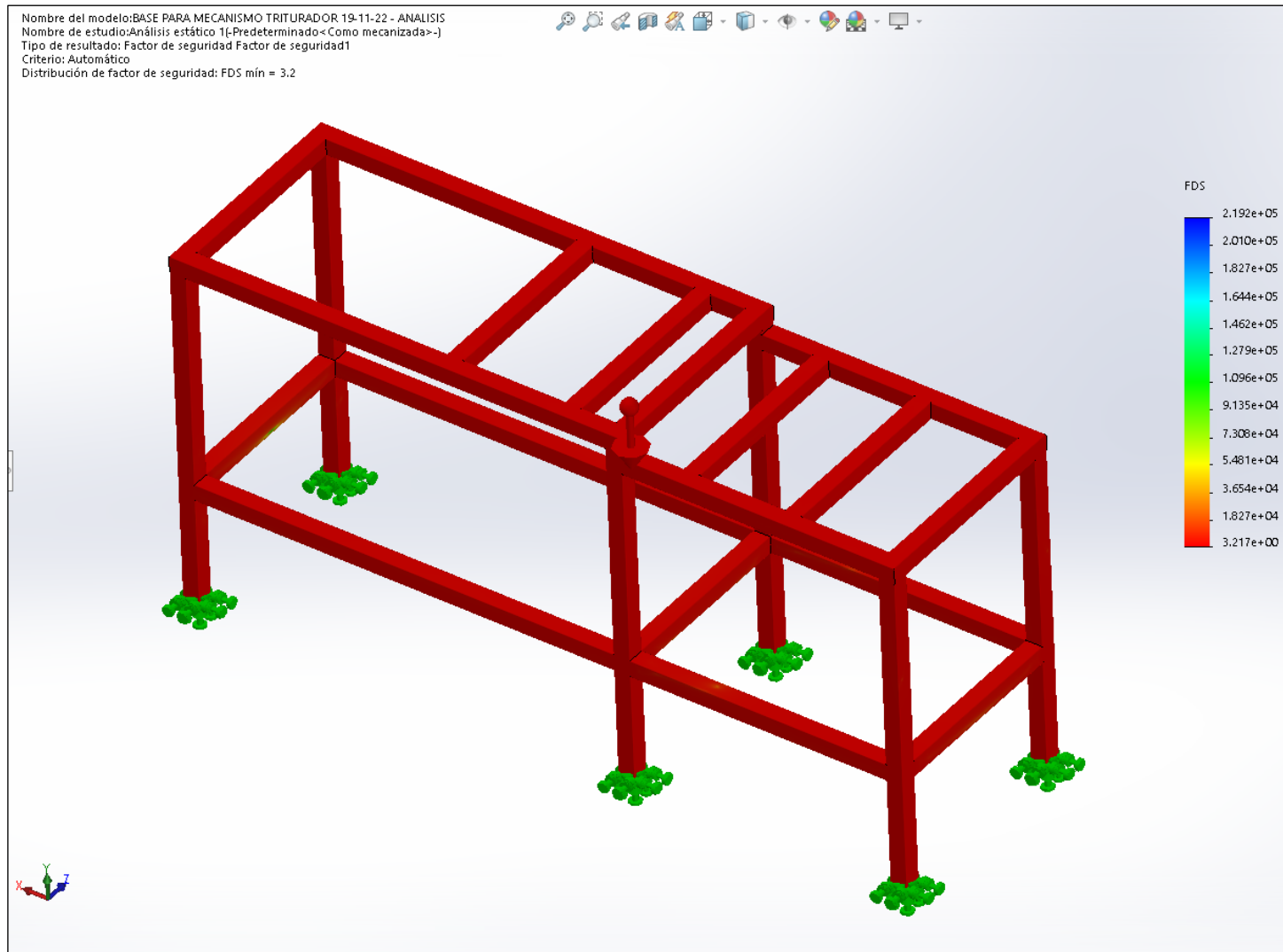
Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

Figura 42. Deformaciones obtenidas del análisis para la base (Escala de deformación=1)



Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

Figura 43. Factores de seguridad obtenidos del análisis estático para la base



Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

4.3.3. Ensamblaje del mecanismo triturador

Una vez se ha finalizado con el modelado de los componentes y realizado sus respectivos análisis estáticos, se procedió al ensamblaje de todos los elementos de máquina del mecanismo triturador.

En la Figura 44 se puede observar todas las vistas del ensamblaje de los elementos del mecanismo triturador.

En la Figura 45 se puede apreciar de igual modo, todas las vistas respectivas pero se ha configurado para que algunos elementos se vean transparentes y se puede ver el interior del mecanismo triturador, donde se puede apreciar los engranajes, piñones, cuchillas trituradoras, ejes portacuchillas, engranajes para transmitir la rotación a los ejes portacuchillas y puedan rotar en sentidos opuestos.

En la Figura 46 se observa la vista isométrica del ensamblaje del mecanismo triturador, para una mejor apreciación de los elementos de máquina que lo conforman.

En el Anexo 3 se tiene el plano de cuchilla trituradora.

En el Anexo 4 se tiene el plano de los separadores para las cuchillas trituradoras.

En el Anexo 5 se tiene el plano del eje portacuchillas 1.

En el Anexo 6 se tiene el plano de la tolva de alimentación.

En el Anexo 8 se tiene el plano del piñón de 17 dientes.

En el Anexo 9 se tiene el plano del engranaje de 38 dientes.

En el Anexo 10 se tiene el plano de la base para mecanismo triturador.

En el Anexo 11 se tiene el plano de la caja reductora para engranajes de dientes rectos.

En el Anexo 12 se tiene el plano de la tapa protectora para caja reductora.

En el Anexo 13 se tiene el plano de la tapa protectora para eje del motor.

En el Anexo 14 se tiene el plano del eje para piñón a eje del motor.

En el Anexo 15 se tiene el plano del eje para el sistema de engranajes de dientes rectos.

En el Anexo 16 se tiene el plano de la caja portacuchillas.

En el Anexo 17 se tiene el plano del protector para engranajes.

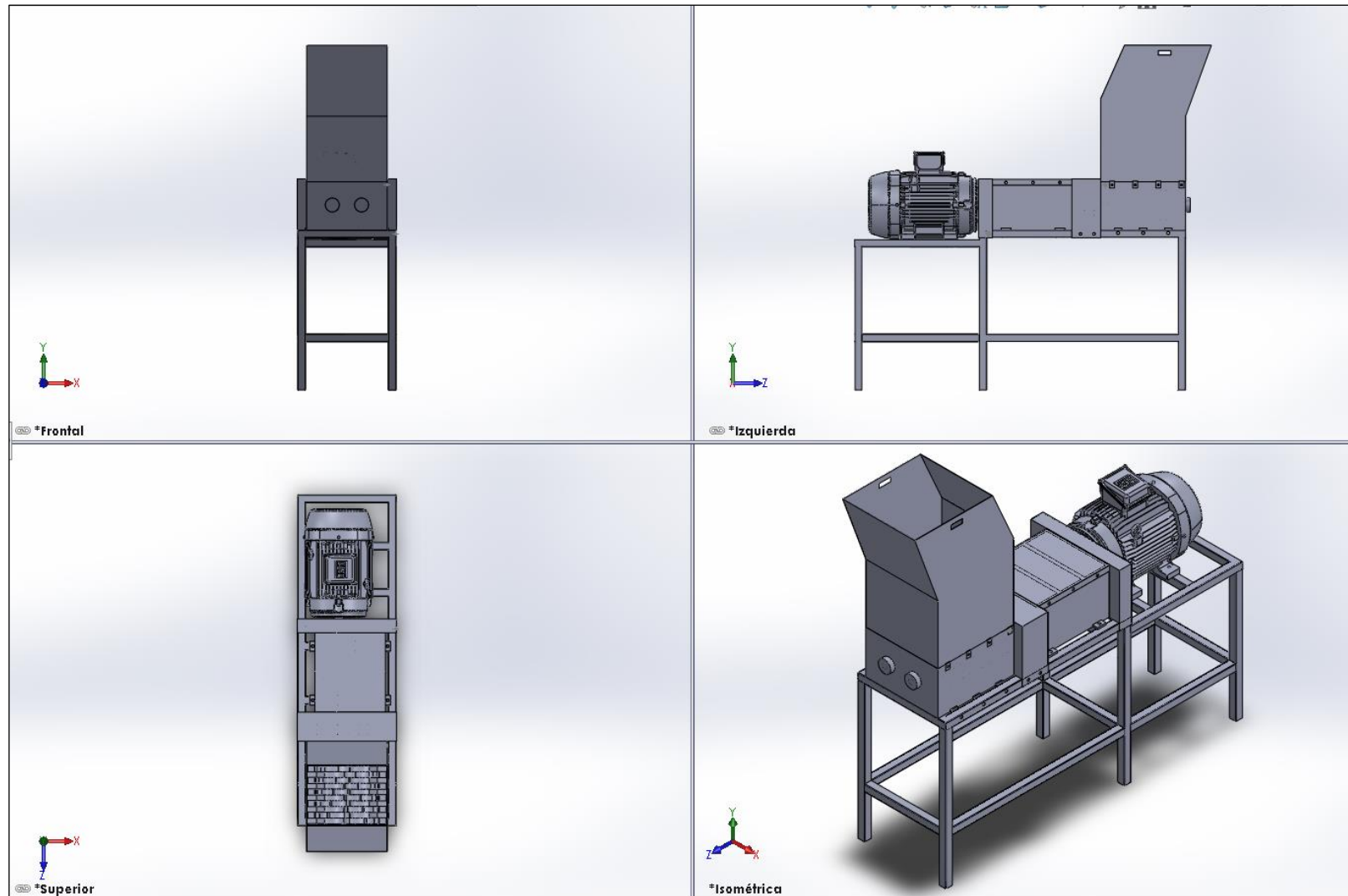
En el Anexo 18 se tiene el plano del eje para engrana a engrane de eje portacuchillas.

En el Anexo 19 se tiene el plano de engranaje para eje portacuchillas.

En el Anexo 20 se tiene el plano del eje portacuchillas 2.

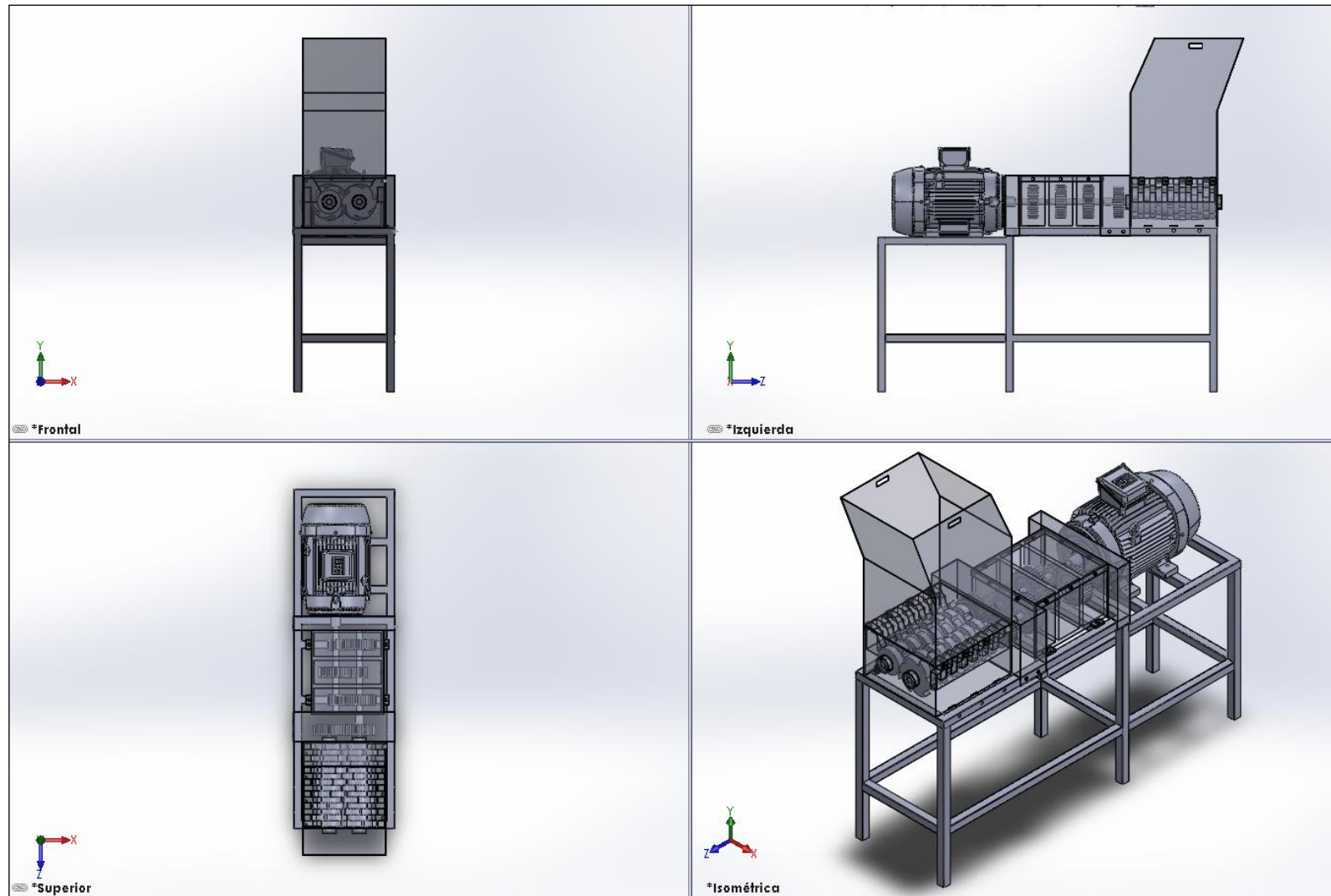
En el Anexo 21 se aprecia el ensamblaje total de todos los elementos de máquina que conforman al mecanismo triturador.

Figura 44. Vistas respectivas del ensamblaje del mecanismo triturador



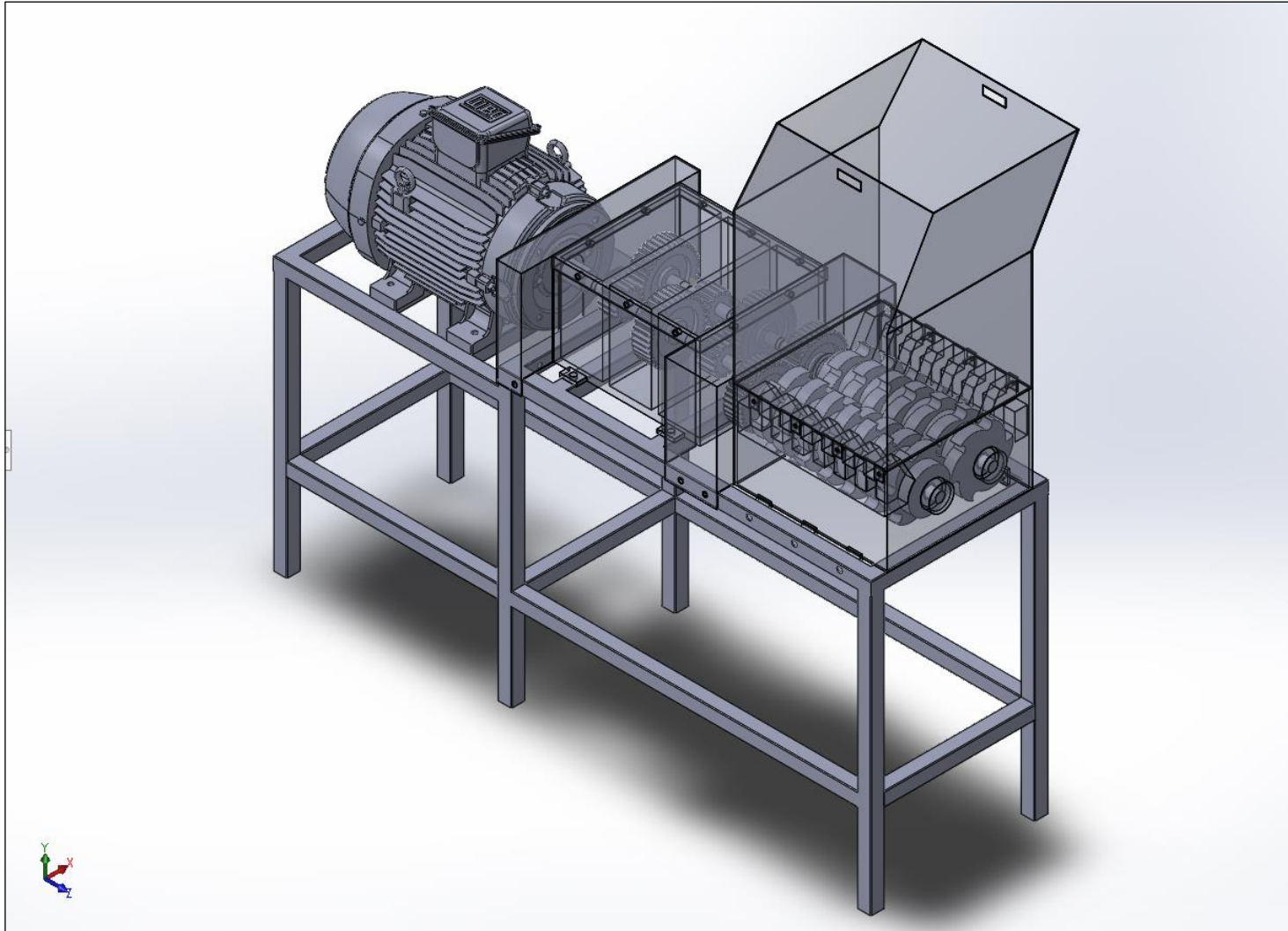
Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

Figura 45. Vistas respectivas del ensamblaje del mecanismo triturador con transparencia



Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

Figura 46. Vista isométrica del ensamblaje del mecanismo triturador



Fuente: Elaborado con SolidWorks 2018.

4.4. Presupuesto

Todo proyecto requiere que se realice el presupuesto que se requiere para lograr implementarlo, donde se realizaron las tablas siguientes sobre los costos de cada elemento que conforma el mecanismo triturador de PET.

En la Tabla 13 se puede observar el costo por concepto de equipos, materiales e insumos para la fabricación del mecanismo triturador de PET, donde el monto calculado fue de S/. 16 540.06, incluyendo IGV.

En la Tabla 14 se observa que el costo por concepto de instalación, montaje y pruebas, asciende al monto de S/. 9 412.86, incluyendo IGV.

En la Tabla 15 se observa el costo total de fabricar el mecanismo triturador de PET, considerando tanto el equipamiento, materiales e insumos más el concepto por instalación, montaje y pruebas, donde el monto fue de S/. 25 952.92.

Tabla 13. Costo de equipamiento, materiales e insumos para mecanismo de limpieza de residuos sólidos

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Costo total
Motor Eléctrico de 10 HP WEG W22 Prueba de explosión High Efficiency	1	Und	S/. 2 999.00	S/. 2 999.00
Cuchillas trituradoras en acero AISI 1045 estirado en frío	14	Und	S/. 149.00	S/. 2 086.00
Separador de cuchillas en acero AISI 1045 estirado en frío	14	Und	S/. 69.00	S/. 966.00
Ejes portacuchillas en acero AISI 1045 estirado en frío	2	Und	S/. 1 299.00	S/. 2 598.00
Tolva de alimentación en acero galvanizado de 2 mm de espesor	1	Und	S/. 399.00	S/. 399.00
Rodamiento SKF N° 62305-2RS1 + soporte (1 rodamiento + 1 soporte)	2	Und	S/. 149.00	S/. 298.00
Piñón de 17 dientes en acero AISI 4140 grado 2 de HB 388	3	Und	S/. 99.00	S/. 297.00
Engrane de 38 dientes en acero AISI 4140 grado 2 de HB 388	3	Und	S/. 249.00	S/. 747.00
Eje portaengranajes para sistema de transmisión	2	Und	S/. 199.00	S/. 398.00
Eje para piñón a eje del motor	1	Und	S/. 169.00	S/. 169.00
Eje para engrane a engrane para eje portacuchillas	1	Und	S/. 179.00	S/. 179.00
Protector para engranajes exteriores en acero galvanizado	1	Und	S/. 79.00	S/. 79.00
Engranaje para ejes portacuchillas en acero AISI 4140 grado 2 de HB 388	2	Und	S/. 249.00	S/. 498.00
Caja reductora de velocidad con engranajes de dientes rectos	1	Und	S/. 399.00	S/. 399.00
Tapa protectora para caja reductora de velocidad	1	Und	S/. 109.00	S/. 109.00
Tapa protectora para eje del motor	1	Und	S/. 99.00	S/. 99.00
Caja portacuchillas en acero 1045	1	Und	S/. 699.00	S/. 699.00
Base de mecanismo triturador de PET en acero A500 tubo de 40 mm x 40 mm x 3 mm	1	Und	S/. 799.00	S/. 799.00
Accesorios (pernos, tuercas)	1	Glb	S/. 199.00	S/. 199.00
Subtotal				S/. 14 017.00
IGV				S/. 2 523.06
Costo total de equipamiento, materiales e insumos + IGV				S/. 16 540.06

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Costo por concepto de instalación, ensamble y pruebas

Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Costo total
Costo de instalación	1	Glb	S/. 4 999.00	S/. 4 999.00
Costo de ensamble	1	Glb	S/. 1 999.00	S/. 1 999.00
Costo de pruebas	1	Glb	S/. 999.00	S/. 999.00
Subtotal				S/. 7 977.00
IGV				S/. 1 435.86
Costo total por concepto de instalación, ensamble y pruebas + IGV				S/. 9 412.86

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Costo total del mecanismo de limpieza de residuos sólidos

Concepto	Costo total
Equipamiento, materiales e insumos + IGV	S/. 16 540.06
Instalación, ensamble y pruebas + IGV	S/. 9 412.86
Costo total del mecanismo triturador de PET	S/. 25 952.92

Fuente: Elaboración propia.

Evaluación con Indicadores Económicos.

La evaluación económica de la propuesta está función a la factibilidad que se analiza con los indicadores económicos, los cuales son el Valor Actual Neto, la Tasa Interna de Retorno y la Relación Beneficio Costo.

Ingresos Estimados del Proyecto

Los ingresos estimados del proyecto, se refiere al costo del servicio de trituración del material Tereftalato de Polietileno, el cual varía cada año en función a la oferta del servicio, como también al precio por cada Tonelada de Tereftalato de Polietileno triturado; y según la proyección de la oferta, en el primer año se tiene una capacidad de producción de 3213 Kg/día, el

cual equivale tener una capacidad de producción de 77112 Kg al mes (24 días de labor). El precio del servicio por Tonelada de trituración de Tereftalato de Polietileno es de 120 Soles /Tonelada. Con ello se tiene que los ingresos mensuales ascienden a 9253.2 Soles al mes, se hace el análisis para un periodo de 12 meses

Flujo de caja del Proyecto.

El flujo de caja del proyecto evalúa los ingresos y egresos durante el periodo de tiempo, es decir.

Tabla 15. Flujo de Caja del Proyecto.

Item		Meses												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Inversión S/.		25 952.92												
Ingresos S/.			9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2
Egresos S/.	Energía Eléctrica		110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
	Operador		1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
	Logística		400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
	Total		2310	2310	2310	2310	2310	2310	2310	2310	2310	2310	2310	2310
Utilidad S/.			6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2

Fuente: Autoría Propia.

Valor Actual Neto

Todos los valores de los flujos de caja son llevados al momento presente (mes 0), donde se inicia el proyecto, con una tasa de interés del 2.5% mensual, que es la tasa de interés para proyectos de inversión del tipo de mercado privado. Esta tasa es una tasa para proyectos de inversión de mediano plazo. Se utilizó el comando VNA del software Microsoft Excel, en un periodo de 12 meses.

Utilidad actualizada al tiempo 0:

$$Ia = \frac{In * [(1 + i)] ^n - 1}{[i * (1 + i)^n]}$$

Item	Meses												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Inversión S/.	25 952.92												
Ingresos S/.		9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2
Total		2310	2310	2310	2310	2310	2310	2310	2310	2310	2310	2310	2310
Utilidad S/.		6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2
VAN	S/ 71,221.71												

El valor actual neto es la diferencia entre los costos actualizados con la tasa de interés 2.5% y el valor de la inversión inicial, es decir que el valor actual neto es:

$$VAN = 71221.71 - 25952.92 = S/ 45,268.79$$

Tasa Interna de Retorno

Se calcula haciendo que el valor actual de las utilidades sea igual a la inversión inicial, para lo cual se utiliza la expresión:

$$Inv = \frac{Ia * [(1 + TIR)] ^n - 1}{[TIR * (1 + TIR)^n]}$$

Item		Meses												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Inversión S/.		25952.92												
Ingresos S/.			9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2	9253.2
Egresos S/.	Total		2310	2310	2310	2310	2310	2310	2310	2310	2310	2310	2310	2310
Utilidad S/.		-25952.92	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2	6943.2
TIR		24.9%												

Utilizando el comando TIR del Microsoft Excel, se tiene que el valor de 24.9% es la tasa interna de retorno del proyecto al mes, que es mayor al 2.5% que es la tasa de interés que manejan las entidades financieras.

Relación Beneficio Costo.

La relación beneficio costo, se obtiene de dividir los beneficios actualizados del proyecto entre la inversión inicial.

$$R \text{ b/c} = 71221.71 / 25952.92 = 2.74$$

Es decir, que por cada sol de inversión se recuperan 2.74 soles, valor que hace factible la realización del proyecto.

V. DISCUSIÓN

Al momento de determinar la oferta disponible de PET en la región de Chiclayo, donde se empleó información del Sistema de Información para la Gestión de Residuos sólidos y el Instituto Nacional de Estadística e Informática, de los años respectivos, donde se hizo un análisis de regresión de lineal para obtener la oferta de PET para los 20 años de vida útil del mecanismo triturador, donde la generación de PET para el año 2023 fue de 3213 kg/día y para el año 2043 fue de 7551 kg/día, donde la capacidad de trituración del mecanismo triturador fue de 472 kg/h, en concordancia con Hidalgo Aguilera et al. (2017), quien en su investigación determinó la capacidad de la máquina trituradora de forma similar, y además, que logrará triturar hasta botellas de una capacidad de 3 litros.

Luego, al dimensionar los elementos de máquina del mecanismo triturador, se determinó que está conformado por los elementos más importantes, siendo las cuchillas trituradoras en acero AISI 1045 estirado en frío, caja portaengranajes en acero AISI 1045 estirado en frío, los ejes portacuchillas en acero AISI 1045 y la base o soporte del mecanismo triturador en acero A500, que en consideración con Reddy & Raju (2018), quienes determinaron que su máquina trituradora de igual manera estuvo conformada por elementos mecánicos y eléctricos, siendo los más importantes, las cuchillas trituradoras, el sistema de transmisión por fajas en V, los ejes portacuchillas y tolva de alimentación.

Seguidamente, al determinar la velocidad de rotación del mecanismo triturador, es decir, de los ejes portacuchillas para poder triturar el PET, la cual fue de 80 rpm, en consideración con Janfrex (2022), pudiendo ser de entre 3.6 a 83 rpm, que en contraste con el autor Naranjo Vargas et al. (2021), donde emplearon

un tipo de corte por cizallamiento, pero la velocidad de las cuchillas fue de 10 rpm, encontrándose en el rango que indica Janfrex (2022).

Al determinar el presupuesto del mecanismo triturador, se determinó que fue de S/. 25 952.92, pero no se puede realizar un análisis de discusión de resultados porque no se encontraron datos en investigaciones respecto a mecanismos trituradores o máquinas trituradoras.

Cabe precisar, que el diseño del mecanismo triturador para reducir el volumen de transporte de PET triturado, permitió determinar un mejoramiento en el desempeño de forma más eficiente y además de obtener un proceso de trituración de plástico con un mayor rendimiento. En consideración con Ravi (2018), quien logró determinar que la cuchilla trituradora empleada en su máquina trituradora le permitió obtener una eficiencia mayor con respecto a otros tipos de cuchillas, además de que obtuvo un factor de seguridad alto, lo que ofrecía una vida útil considerable a efectos de fatiga, adicionalmente, lograron obtener elementos más delgados permitiendo una reducción considerable del volumen de transporte de PET.

Al momento de realizar el análisis de la cuchilla trituradora, en primer lugar, se seleccionaron cuchillas de 6 puntas, con el fin de aumentar la vida útil de las mismas, y obtener un mayor rendimiento, obteniendo un factor de seguridad de 5.300, con un esfuerzo máximo de Von Mises de 99.99 MPa, que de acuerdo con Wong et al. (2022), quien obtuvo resultados similares con el mismo tipo de cuchillas aunque de menos puntas, pero ofreciendo mejores resultados debido a la excelente geometría de las cuchillas trituradoras. De igual forma, al compararse con los resultados de Khoa Nguyen et al. (2021), donde lograron

determinar que aún era necesario seguir haciendo evaluaciones ya que se tienen múltiples geometrías que pueden ayudar a optimizar el proceso de trituración, aunque para la presente investigación se empleó un tipo de cuchillas de 6 puntas, las cuales permiten un proceso de trituración bastante eficiente, ya que su factor de seguridad de 5.300, que al ser elevado, permite obtener un mejor rendimiento de las cuchillas, ya que lograrán cumplir con su vida útil sin ningún problema.

Al momento de dimensionar la potencia del motor para el mecanismo triturador, se obtuvo que dicho motor debe tener una capacidad de 10 HP, para poder triturar la capacidad de PET determinada, que en consideración con Dollera et al. (2019), donde calcularon un motor de 2 HP para la máquina trituradora que propusieron, cabe precisar, que es menor a la potencia del motor calculado en la presente investigación debido a que es de menor capacidad y los elementos son más pequeños, lo que en realidad es correcto y adecuado, ya que mientras se tenga más capacidad y los elementos sean más grande, la potencia para mover y poder cumplir con los requerimientos solicitados será mayor. Además, logró determinar que se obtuvo una disminución en el volumen de transporte de PET en un 82.41%, logrando ahorrar costos y mano de obra.

Seguidamente, Faiyyaj et al. (2017) desarrollaron una máquina trituradora de plástico para ser usado en el ámbito doméstico, industrial, etcétera; con el fin de reducir el uso de plástico y poder ser empleado luego de ser triturado en pequeños trozos para facilitar la administración de residuos. Se asemeja a la actual investigación, ya que también se buscó reducir el tamaño del PET, donde primero se tritura para luego ser transportado con un volumen mucho más

reducido y así obtener un ahorro en costos y poder transportar más cantidad de PET.

VI. CONCLUSIONES

- La oferta de PET disponible en la ciudad de Chiclayo tiene una variación debido a que cada año se tuvo un aumento de la generación de PET, es decir, que para el año 2023 se generará 3213 kg/día de PET, para el año 2024 de 3429 kg/día, y así sucesivamente, hasta que en el año 2043 será de 7551 kg/día, esto, considerando que el mecanismo triturador tiene una vida útil de 20 años.
- Del dimensionamiento de los elementos de máquina, se tienen a las cuchillas trituradoras de 180 mm de diámetro y 30 mm de espesor, en acero AISI 1045 estirado en frío, ejes portacuchillas con una sección hexagonal que forman un diámetro de 27 mm de extremo a extremo fabricado con el mismo material, piñón de 17 dientes y engranajes de 38 dientes fabricados en acero AISI 4140 grado 2 de HB 388, base para el mecanismo triturador fabricado en acero A500.
- Del modelado en SolidWorks se pudo determinar que, al realizar un análisis estático para los elementos del mecanismo triturador, lograron cumplir con los factores de seguridad adecuados para un buen funcionamiento del mecanismo triturador propuesto.
- El presupuesto para poder fabricar el mecanismo triturador fue de S/. 25 952.92, incluyendo equipamiento, insumos y materiales además de los conceptos de instalación, montaje y pruebas.

VII. RECOMENDACIONES

- Previo al almacenaje del material PET, éste sea comprimido con la finalidad de ocupar el menor espacio posible.
- Luego de implementar la construcción de la máquina, disponer la colocación de elementos de seguridad y protección del personal operador.
- Procurar el almacenado inmediato del producto de corte del PET, en depósitos cerrados para evitar su presencia como material en suspensión en aire, es decir, contaminante.

REFERENCIAS

- Alvarado Díaz, W., Chicoma Moreno, J., Meneses Claudio, B., & Nuñez Tapia, L. (2021). Design of a Plastic Shredding Machine to Obtain Small Plastic Waste . *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(6), 478-483.
- Buteler, M. (2019). ¿Qué es la contaminación por plástico y por qué nos afecta a todos? *Universidad Nacional del Comahue. Centro Regional Universitario Bariloche; Desde la Patagonia. Difundiendo Saberes*, 16(28), 56-60.
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2020). *Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones* (4ta edición ed.). Mc Graw Hill.
- Crippa, M., De Wilde, B., Koopmans, R., Leyssens, J., Muncke, J., Ritschkoff, A. C., . . . Wagner, M. A. (2019). *A circular economy for plastics: Insights from research and innovation to inform policy and funding decisions*. European Commission. <https://doi.org/10.2777/269031>
- Curtis, A., & Sarc, R. (2021). Real-time monitoring of volume flow, mass flow and shredder power consumption in mixed solid waste processing. *Waste Management*, 131, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.05.024>
- Dollera, E. B., Golez Jr., R. C., Rizal C. Ty, S. D., Gaston, J. F., & Balo, J. V. (2019). Development of XU Plastic Shredder for Cost Effective Means of Minimizing Polyethylene Terephthalate Plastic Waste Volume . *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 8(12), 2821-2825. <https://doi.org/10.35940/ijitee.L3028.1081219>
- Faiyyaj, M. I., Pradip, M. R., Dhanaji, B. J., Chandrashekhar, D. P., & Shivaji, J. S. (2017). Design and Development of Plastic Shredding Machine. *International Journal of Engineering Technology Science and Research*, 4(10), 733-737.
- Fritsch GmbH. (2022). *Molinos De Corte - Una Limpieza Incomparablemente Sencilla*. Flexibles y Robustos: <https://www.fritsch.es/preparacion-de-muestras/molienda/molinos-de-corte/#:~:text=Los%20molinos%20a%20cuchillas%20son,la%20preparaci%>

C3%B3n%20de%20mezclas%20heterog%C3%A9neas.

- Gil P, S. A., & Espinosa B, A. (2018). Evaluación de la potencia de un molino de martillos al procesar bagazo de caña de azúcar. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 36(1), 93-108. <https://doi.org/10.22267/rcia.193601.101>
- Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la Investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Mc Graw Hill.
- Hidalgo Aguilera, L., Imbaquingo, J., & Mideros, D. (2017). Diseño e implementación de una máquina recicladora de botellas plásticas por corte, controlada automáticamente. *Enfoque UTE*, 8(5), 89-102.
- Huemer, M. (2019). An Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data. *PlasticsEurope*.
- INEI. (2020). *Perú: Estimaciones y Proyecciones de Población por Departamento, Provincia y Distrito, 2018 - 2020 (Boletín Especial N°26)*. INEI.
- ItalesMEX. (24 de septiembre de 2018). *Tipos de trituradoras para el reciclaje de residuos*. <https://italesmex.com/tipos-de-trituradoras-reciclaje-optimo/>
- Jadhav, N., Patil, A., Lokhande, H., & Turambe, D. (2018). Development of Plastic Bottle Shredding Machine. *International Journal of Waste Resources*, 8(2), 1-4. <https://doi.org/10.4172/2252-5211.1000336>
- Janfrex. (2022). *Trituradoras y Molinos para Plastico*. Janfrex: <https://www.janfrex.mx/site/trituradoras-y-molinos-para-plastico/>
- Juvinall, R. C., & Marshek, K. M. (2013). *Diseño de Elementos de Máquinas*. LIMUSA Wiley.
- Khoa Nguyen, T., Quang Chau, M., Do, T.-C., & Pham, A.-D. (2021). Characterization of geometrical parameters of plastic bottle shredder blade utilizing a two-step optimization method. *Archive of Mechanical Engineering*, 68(3), 253-269. <https://doi.org/10.24425/ame.2021.138392>
- Lozada, J. (2015). Investigación Aplicada: Definición, Propiedad Intelectual e Industria. *CienciAmérica: Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica*, 3(1), 34-39.

- Molina Castro, R. E., Gómez Ronquillo, W. J., & De la Cruz Lozado, J. (2021). Contaminación marina por desechos plásticos en países del perfil costero del Pacífico Sur, 2016-2021. *Polo del Conocimiento*, 6(5), 458-478. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i5.2671>
- Monteza Leiva, W. (2019). *Diseño de una máquina trituradora de botellas plásticas de 100 kg/h para optimizar su transporte y almacenamiento en la empresa recicladora planeta verde EIRL - Chiclayo*. Repositorio de la Universidad César Vallejo.
- Mott, R. L. (2006). *Diseño de Elementos de máquinas* (4ta edición ed.). Pearson Prentice Hall.
- Naranjo Vargas, E. M., Moyano Arévalo, J. R., & Santillán Mariño, C. J. (2021). Diseño y construcción de un prototipo de máquina recicladora de botellas plásticas PET. *Conciencia Digital*, 4(1.2), 147-161. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v4i1.2.1585>
- Pedraza Yepes, C., Pelegrina Romero, M. A., & Pertúz Martínez, G. J. (2018). Analysis by Means of the Finite Element Method of the Blades of a PET Shredder Machine with Variation of Material and Geometry . *Contemporary Engineering Sciences*, 11(83), 4113-4120. <https://doi.org/10.12988/ces.2018.88370>
- Pisani Junior, R., Avezum Alves de Castro, M. C., & Álvarez da Costa, A. (2018). Development of a correlation to estimate per capita municipal solid waste generation rates in São Paulo state, Brazil: population, per capita income and electricity consumption influences. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 23(2), 415-424. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018167380>
- Ravi, S. (2018). Utilization of Upgraded Shredder Blade and Recycling the Waste Plastic and Rubber Tyre. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 3208-3216.
- Reddy, S., & Raju, T. (2018). Design and Development of mini plastic shredder machine . *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 455, 1-7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/455/1/012119>
- Sánchez Flores, F. A. (2019). Fundamentos epistémicos de la investigación

- cualitativa y cuantitativa: Consensos y disensos. *Revista digital de investigación en Docencia Universitaria*, 13(1), 102-122. <https://doi.org/10.19083/ridu.2019.644>
- Sandoya Lara, D. G., & Macias Coello, C. M. (2021). *Diseño y construcción de un equipo triturador-extrusor de material plástico reutilizable tipo Tereftalato de Polietileno (PET) para la elaboración de filamento para impresoras 3D*. Repositorio de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.
- Schyns, Z. O., & Shaver, M. P. (2021). Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. *Macromolecular Rapid Communications*, 42, 1-27. <https://doi.org/10.1002/marc.202000415>
- SIGERSOL. (2012). *Informe Anual 2012*. Ministerio del Ambiente.
- SIGERSOL. (2013). *Informe Anual 2013*. Ministerio del Ambiente.
- SIGERSOL. (2014). *Informe Anual 2014*. Ministerio del Ambiente.
- SIGERSOL. (2015). *Informe Anual 2015*. Ministerio del Ambiente.
- SIGERSOL. (2021). *Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos*. <https://sistemas.minam.gob.pe/SigersolMunicipal/#/accesoLibre/generacion>
- SKF. (2019). *Catálogo de Rodamientos*. SKF.
- Vela Rojas, C. C., Rey Romero, E. J., & Jaimes Rada, A. N. (2018). *Diseño y Construcción de prototipo de trituración para PET: Análisis sistemático de Literatura*. Repositorio de la Universidad Cooperativa de Colombia.
- Wong, J. H., Gan, M. J., Chua, B. L., & Siambun, N. J. (2022). Shredder machine for plastic recycling: A review paper. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1217, 1-11. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1217/1/012007>
- Worrell, E., & Reuter, M. A. (2014). *Handbook of Recycling: State of the Art for practitioners, analysts, and scientists*. Elsevier.
- Zargar, K., & Singla, S. (2020). Impact Of PET Plastic Waste On Mechanical Properties Of Mix Concrete Design. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 9(4), 88-93.

ANEXOS

Anexo 1: Cuadro de Operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores
Independiente Diseño de mecanismo triturador	Máquina conformada por elementos de máquina que tiene la capacidad de triturar el plástico PET para reducirlo a partículas mínimas para su reciclado (Baño Marti, 2019).	Proceso que parte del análisis físico de fuerzas requeridas.	Parámetros de diseño	<ul style="list-style-type: none"> - Fuerza - Torque - Esfuerzo - Factor - Potencia
			Costos de inversión	<ul style="list-style-type: none"> - Costo material - Costo obra
Dependiente Reducir volumen de transporte de PET reciclado	Proceso que sirve para la recuperación de residuos plásticos PET para su reutilización como materia prima para elaborar nuevos productos o también como productos químicos o combustibles (Twenergy, 2021). El volumen de PET es reducido mediante el proceso de trituración, pudiendo ser transportado de forma más eficiente (Dollera et al., 2019).	Para lograr obtener plástico triturado, éste debe pasar por el proceso de trituración en el mecanismo triturador, para posteriormente obtener PET reciclado de menor volumen para su optimización al transportarse.	Capacidad de reciclaje	Flujo Volumen reciclado

Anexo 2 – Instrumentos de Recolección de Datos

Registro de Cantidad de Residuos en la ciudad de Chiclayo por año

Año	PET (%)	Cantidad de residuos sólidos por día (t/día)	Cantidad de PET anual (t/año)	Generación de PET diario (t/día)
2012				
2013				
2014				
2015				
2016				
2017				
2018				
2019				
2020				
2021				

Anexo 3 – Informes de 2012 al 2015 de SIGERSOL



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

SISTEMA DE INFORMACIÓN PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Informe Anual 2012

Fecha de Impresión: 19-05-2022

A. INFORMACION GENERAL

Región: **Lambayeque** Provincia: **Chiclayo** Distrito: **Chiclayo**

Dirección:

Alcalde: **PERCY ALBERTO RAMOS PUELLES**Responsable del Área de Limpieza Pública: **ANTONIO MENDOZA ARAUJO**Teléfono: **074-282092**Fax: **074-282092**E-mail: **gerservicios@munilambayeque.gob.pe**Población Urbana: **48273** Hab. Población Rural: **15113** Hab.

A.1. PLAN DE MANEJO

El municipio cuenta con un Plan de Gestión de Residuos Sólidos aprobado mediante **Ordenanza Municipal** con número **018/2011-MPL** aprobado en el año **2011**.

A.2. ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN

El municipio **SI** cuenta con Estudio de Caracterización aprobado el año **2011**.

El número de muestra obtenida es de **50** viviendas.

La generación per cápita de residuos sólidos municipales es de **0.00** kg./hab./día y la de residuos domiciliarios es de **0.43** kg./hab./día.

La Densidad promedio de los Residuos Sólidos Domiciliarios compactados es de **0.00** Kg/m³ y sin compactar es de **241.28** Kg/m³.

El porcentaje de humedad de los residuos sólidos es de **0.00**%.

La Composición de Residuos Sólidos Domiciliarios es para:

Materia Orgánica	59.94	Metales	2.99
Madera, follaje	0.85	Telas, textiles	0.20
Papel	1.49	Caucho, cuero y jebe	0.30
Cartón	5.33	Pilas	0.08
Vidrio	1.96	Restos de medicinas, focos	0.60
Plástico PET	4.35	Residuos sanitarios	4.30
Plástico Duro	4.35	Material inerte	8.77
Bolsas	1.20	varios	2.99
Tecnopor y similares	0.30		



PERÚ
Ministerio
del Ambiente



SISTEMA DE INFORMACIÓN PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Informe Anual 2013

Fecha de Impresión: 19-05-2022

A. INFORMACION GENERAL

Región: **Lambayeque** Provincia: **Chiclayo** Distrito: **Chiclayo**

Dirección:

Alcalde: **PERCY ALBERTO RAMOS PUELLES**

Responsable del Área de Limpieza Pública: **SEBASTIAN ENEQUE AYALA**

Teléfono: **074282092** Fax:

E-mail: **gerservicios@munilambayeque.gob.pe**

Población Urbana: **48273** Hab. Población Rural: **15113** Hab.

A.1. PLAN DE MANEJO

El municipio cuenta con un Plan de Gestión de Residuos Sólidos aprobado mediante **Ordenanza Municipal** con número **OM 011/2013-MPL** aprobado en el año **2013**.

A.2. ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN

El municipio **SI** cuenta con Estudio de Caracterización aprobado el año **2013**.

El número de muestra obtenida es de **54** viviendas.

La generación per cápita de residuos sólidos municipales es de **0.00** kg./hab./día y la de residuos domiciliarios es de **0.56** kg./hab./día.

La Densidad promedio de los Residuos Sólidos Domiciliarios compactados es de **0.00** Kg/m³ y sin compactar es de **212.33** Kg/m³.

El porcentaje de humedad de los residuos sólidos es de **0.00**%.

La Composición de Residuos Sólidos Domiciliarios es para:

Materia Orgánica	51.33	Metales	1.70
Madera, follaje	0.54	Telas, textiles	1.04
Papel	4.50	Caucho, cuero y jebe	0.60
Cartón	5.68	Pilas	0.16
Vidrio	2.76	Restos de medicinas, focos	0.47
Plástico PET	2.35	Residuos sanitarios	7.19
Plástico Duro	2.62	Material inerte	9.25
Bolsas	7.31	varios	1.66
Tecnopor y similares	0.84		



PERÚ
Ministerio
del Ambiente



SISTEMA DE INFORMACIÓN PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Informe Anual 2014

Fecha de Impresión: 19-05-2022

A. INFORMACION GENERAL

Región: **Lambayeque** Provincia: **Chiclayo** Distrito: **Chiclayo**

Dirección:

Alcalde: **RICARDO CASIMIRO VELEZMORO RUIZ**

Responsable del Área de Limpieza Pública: **JORGE SANTISTEBAN CHICOMA**

Teléfono: **074282092**

Fax:

E-mail: **reciclandoenlambayeque@hotmail.com**

Población Urbana: **48273** Hab. Población Rural: **15113** Hab.

A.1. PLAN DE MANEJO

El municipio cuenta con un Plan de Gestión de Residuos Sólidos aprobado mediante **Ordenanza Municipal** con número **OM-011/2013-MPL** aprobado en el año **2013**.

A.2. ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN

El municipio **SI** cuenta con Estudio de Caracterización aprobado el año **2013**.

El número de muestra obtenida es de **54** viviendas.

La generación per cápita de residuos sólidos municipales es de **0.00** kg./hab./día y la de residuos domiciliarios es de **0.56** kg./hab./día.

La Densidad promedio de los Residuos Sólidos Domiciliarios compactados es de **0.00** Kg/m³ y sin compactar es de **212.33** Kg/m³.

El porcentaje de humedad de los residuos sólidos es de **0.00**%.

La Composición de Residuos Sólidos Domiciliarios es para:

Materia Orgánica	51.33	Metales	1.70
Madera, follaje	0.54	Telas, textiles	1.04
Papel	4.50	Caucho, cuero y jebe	0.60
Cartón	5.68	Pilas	0.16
Vidrio	2.76	Restos de medicinas, focos	0.47
Plástico PET	2.35	Residuos sanitarios	7.19
Plástico Duro	2.62	Material inerte	9.25
Bolsas	7.31		1.66
Tecnopor y similares	0.84		



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

SISTEMA DE INFORMACIÓN PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Informe Anual 2015

Fecha de Impresión: 05-12-2022

A. INFORMACION GENERAL

Región: **Lambayeque** Provincia: **Chiclayo** Distrito: **Chiclayo**

Dirección:

Alcalde: **PERCY ALBERTO RAMOS PUELLES**Responsable del Área de Limpieza Pública: **ANTONIO MENDOZA ARAUJO**Teléfono: **074-282092**Fax: **074-282092**E-mail: **gerservicios@muni.lambayeque.gob.pe**Población Urbana: **48273 Hab.**Población Rural: **15113 Hab.**

A.1. PLAN DE MANEJO

El municipio cuenta con un Plan de Gestión de Residuos Sólidos aprobado mediante **Ordenanza Municipal** con número **018/2011-MPL** aprobado en el año **2011**.

A.2. ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN

El municipio **SI** cuenta con Estudio de Caracterización aprobado el año **2011**.

El número de muestra obtenida es de **50** viviendas.

La generación per cápita de residuos sólidos municipales es de **0,00** kg./hab./día y la de residuos domiciliarios es de **0,43** kg./hab./día.

La Densidad promedio de los Residuos Sólidos Domiciliarios compactados es de **0,00** Kg/m³ y sin compactar es de **241,28** Kg/m³.

El porcentaje de humedad de los residuos sólidos es de **0,00**%.

La Composición de Residuos Sólidos Domiciliarios es para:

Materia Orgánica	59,94	Metales	2,99
Madera, follaje	0,85	Telas, textiles	0,20
Papel	1,49	Caucho, cuero y jebe	0,30
Cartón	5,33	Pilas	0,08
Vidrio	1,96	Restos de medicinas, focos	0,60
Plástico PET	4,35	Residuos sanitarios	4,30
Plástico Duro	4,35	Material inerte	8,77
Bolsas	1,20	varios	2,99
Tecnopor y similares	0,30		



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, SALAZAR MENDOZA ANIBAL JESUS, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - CHICLAYO, asesor de Tesis titulada: "Diseño de un mecanismo triturador para reducir el volumen de transporte de Tereftalato de Polietileno (PET) reciclado - Chiclayo", cuyo autor es ACOSTA RITUAY EDGAR ALAIN, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 11.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

CHICLAYO, 10 de Diciembre del 2022

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
SALAZAR MENDOZA ANIBAL JESUS DNI: 16720249 ORCID: 0000-0003-4412-8789	Firmado electrónicamente por: AJSALAZARM el 10- 12-2022 12:12:09

Código documento Trilce: TRI - 0481884