



Trabajo fin de carrera

**“SELECCIÓN DE UN MATERIAL SOSTENIBLE PARA EL MECANISMO PIÑÓN
CREMALLERA DE UNA BARRA DE DIRECCIÓN HIDRÁULICA
CONSIDERANDO EL MÉTODO DE EVALUACIÓN DE CICLO DE VIDA (LCA) Y
APLICANDO MÉTODOS MULTICRITERIOS (MCDM) Y COMPROBACIÓN POR
ELEMENTOS FINITOS (FEM)”**

Realizado por:

JUAN JOSE VALLEJO GALARRAGA

Director de proyecto:

ING. JAVIER MARTINEZ PHD.

Como requisito para la obtención del título de: **INGENIERO MECANICO EN
AUTOMATIZACION Y CONTROL**

Quito, Agosto del 2020

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Declaración Juramentada

Yo Juan José Vallejo Galárraga, con cédula de identidad 1716246952, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



JUAN JOSE VALLEJO GALARRAGA
C.I.: 1716246952

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

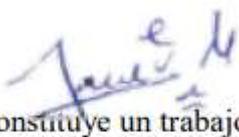
**“SELECCIÓN DE UN MATERIAL SOSTENIBLE PARA EL MECANISMO PIÑÓN
CREMALLERA DE UNA BARRA DE DIRECCIÓN HIDRÁULICA
CONSIDERANDO EL MÉTODO DE EVALUACIÓN DE CICLO DE VIDA (LCA) Y
APLICANDO MÉTODOS MULTICRITERIOS (MCDM) Y COMPROBACIÓN POR
ELEMENTOS FINITOS (FEM)”**

Realizado por:

JUAN JOSE VALLEJO GALARRAGA

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERO MECANICO EN AUTOMATIZACION Y CONTROL


Quien considera que constituye un trabajo original de su autor

Ing. Javier Martínez Gómez PhD

DIRECTOR

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

PROFESORES INFORMANTES

Después de revisar el trabajo presentado. Lo han calificado como apto para defensa oral ante el tribunal examinador



Ing. Jaime Vinicio Molina Osejos, M.Sc.



Ing. Edilberto Antonio Llanes Cedeño, PhD.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Índice de contenido

Declaración Juramentada.....	2
Indice de contenido	5
Indice de figura	8
Indice de tablas.....	11
Indice de anexos	14
Abreviaturas	15
Resumen	16
Abstract.....	18
Introducción	20
Antecedentes.....	20
Planteamiento del problema	22
Justificación.....	24
Objetivo General.....	28
Objetivos Especificos	29
Estado del arte	30
Estudios previos relacionados con la utilización de métodos multicriterio en la selección de materiales, análisis de ciclos de vida y simulación de mecanismos piñón cremallera	30

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Método	36
Tipo de metodología	36
Esquema de la Metodología.....	37
Sistema de direccion en un automovil	38
Que sucede durante la maniobra de giro de la dirección	39
Mecanismo piñón cremallera	39
Modos de falla de un engrane	40
Criterios para la selección del material	41
Bases de datos para la selección del material	43
Selección por índices en CES Edupack	45
Tabla de materiales y propiedades	48
Aplicación de metodos multicriterio	49
Entropia.....	49
Desviacion estandar	50
Variacion Estadistica.....	51
Topsis.....	53
Copras	55
Vikor	57
Análisis de ciclo de vida de materiales candidatos	58

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Correlación de Spearman	70
Datos para el mecanismo piñon cremallera	71
Modelado CAD	75
Simulación por elementos finitos	77
Resultados	85
Resultados selección por índices	85
Resultados de los MCDM.....	87
Resultados Analisis ciclo de vida de los materiales	100
Comparacion de ranking	107
Elección del material	108
Calculos del piñon cremallera.....	110
Resultados de la simulacion.....	111
Discusion de resultados	118
Conclusiones	123
Recomendaciones.....	126
Referencias bibliográficas	127
Anexos.....	143

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Índice de figuras

<i>Figura 1.</i> Ciclo de vida del acero	21
<i>Figura 2.</i> Metodología para desarrollo de AHP.....	24
<i>Figura 3.</i> Esque de la metodología a seguir	37
<i>Figura 4.</i> Sistema de dirección.	38
<i>Figura 5.</i> Mecanismo piñón cremallera	40
<i>Figura 6.</i> Falla en diante por picadura	41
<i>Figura 7.</i> Base de datos CES Edupack	44
<i>Figura 8.</i> Limitante de resistencia a la tracción para la selección de materiales	46
<i>Figura 9.</i> Limitante de procesabilidad para la selección de materiales	47
<i>Figura 10.</i> Limitante de precio para reducir la lista de materiales	47
<i>Figura 11.</i> Analisis del Ciclo de vida del acero (LCA)	58
<i>Figura 12.</i> Ingreso a EcoAudit del CES Edupack.....	59
<i>Figura 13.</i> Herramientas de EcoAudit (Interfaz).	60
<i>Figura 14.</i> Limites del sistema y etapas del ciclo de vida asociado a un producto.	61
<i>Figura 15.</i> Parametros del acero SAE 4140 ingresados en EcoAudit.....	63
<i>Figura 16.</i> Parametros del acero SAE 303 ingresados en EcoAudit.....	64
<i>Figura 17.</i> Parametros de ingreso para acero SAE 5115.	65
<i>Figura 18.</i> Parametros de ingreso para acero SAE 1045.	66
<i>Figura 19.</i> Parametros de ingreso para acero SAE 1050.	67
<i>Figura 20.</i> Parametros de ingreso para acero SAE 1018.	68
<i>Figura 21.</i> Parametros de ingreso para acero SAE 4340.	69
<i>Figura 22.</i> Mecanismo piñón cremallera.	72

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

<i>Figura 23.</i> Grafico de relacio entre fricción y ancho de llanta	72
<i>Figura 24.</i> Piñón dibujado en inventor	75
<i>Figura 25.</i> Cremallera en inventor	75
<i>Figura 26.</i> Ensasmble piñón cremallera.....	75
<i>Figura 27.</i> Selección de tipo de estudio de la barra de herramientas de ANSYS.....	76
<i>Figura 28.</i> Selección de material e ingreso de datos del acero AISI 4340 y 1045.	77
<i>Figura 29.</i> Pasos para importar geometria.	78
<i>Figura 30.</i> Mecanismo piñon cremallera editado en ANSYS.....	78
<i>Figura 31.</i> . Mecanismo piñon cremallera en entorno de estudio	79
<i>Figura 32.</i> Areas de contacto en entorno de estudio.....	80
<i>Figura 33.</i> Mallado del piñon – cremallera.....	80
<i>Figura 34.</i> Detalle de mallado.....	81
<i>Figura 35.</i> Convergencia de simulación.	81
<i>Figura 36.</i> Detalles de aplicación del momento	82
<i>Figura 37.</i> Condiciones de contorno	83
<i>Figura 38.</i> Grafico de resistencia a la tracción (MPa) vs Densidad (Kg/m ³).	84
<i>Figura 39.</i> Resultado de selección mediante CES Edupack.	85
<i>Figura 40.</i> Grafico de resistencia a la tracción (MPa) vs Densidad (Kg/m ³).....	85
<i>Figura 41.</i> Cuadro de comparacion de metodos de ponderación.....	90
<i>Figura 42.</i> Cuadro comparativo de gasto de energia de los materiales	100
<i>Figura 43.</i> Cuadro comparativo de huella de carbono de los materiales.....	101
<i>Figura 44.</i> Comparacion de la huella de carbono entre aceros	102
<i>Figura 45.</i> Comparacion de la energia consumida entre aceros	102

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

<i>Figura 46.</i> Comparación de ranking de aceros por metodos	107
<i>Figura 47.</i> Resultados de deformación SAE 4340.....	115
<i>Figura 48.</i> Resultados de esfuerzo de von misses SAE 4340.....	116
<i>Figura 49.</i> Resultados de factor de seguridad SAE 4340	117
<i>Figura 50.</i> Comparación de calculos y simulacion esfuerzo de von misses SAE 4340	120
<i>Figura 51.</i> Comparación de calculos y simulacion del factor de seguridad.SAE 4340.....	121
<i>Figura 52.</i> Resultados de deformación SAE 1045	124
<i>Figura 53.</i> Resultados de esfuerzo de von misses SAE 1045	125
<i>Figura 54.</i> Resultados de factor de seguridad SAE 1045	126
<i>Figura 55.</i> Comparación de calculos y simulacion esfuerzo de von misses SAE 1045	127
<i>Figura 56.</i> Comparación de calculos y simulacion del factor de seguridad SAE 1045.....	127

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Índice de tablas

Tabla 1 Criterios de evaluación de las propiedades de los materiales	42
Tabla 2 Lista de materiales de propiedades para analisis	48
Tabla 3 Datos para estudio de ciclo de vida	62
Tabla 4 Nomenclatura y formulas para calculos del piñón – cremallera	70
Tabla 5 Datos para simulación	74
Tabla 6 Matriz estandarizada de desición	86
Tabla 7 Matriz normalizada de entropia.....	86
Tabla 8 Valores de e_j y d_j	87
Tabla 9 Pesos obtenidos por entropia	87
Tabla 10 Metodo de desviacion estandar	87
Tabla 11 Pesos obtenidos por desviación estandar	88
Tabla 12 Metodo de variación estadistica	88
Tabla 13 Pesos obtenidos por variación estadostica	89
Tabla 14 Comparación de metodos de ponderación	89
Tabla 15 Matriz normalizada de decisión TOPSIS	91
Tabla 16 Matriz estandarizada de pesos TOPSIS	91
Tabla 17 Soluciones idelaes positivas y negativas	92
Tabla 18 Distancia entres soluciones positivas y negativas	92
Tabla 19 Solucion ideal y ranking TOPSIS.....	93
Tabla 20 Matriz normalizada de decisión COPRAS	93
Tabla 21 Matriz estandarizada de pesos COPRAS	94
Tabla 22 Criterios beneficioso	94

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Tabla 23 Criterio no beneficioso	95
Tabla 24 Importancia relativa	95
Tabla 25 Ranking COPRAS.....	96
Tabla 26 Matriz estandarizada de pesos VIKOR	96
Tabla 27 Maximos y minimos de cada criterio	97
Tabla 28 Indicador de medición R_i	97
Tabla 29 Indicador de medición U_i	98
Tabla 30 Ranking VIKOR.....	98
Tabla 31 Criterios ambientales por materiales	103
Tabla 32 Matriz ambiental normalizada de (entropia).....	103
Tabla 33 Valores de e_j y d_j matriz ambiental	104
Tabla 34 Pesos criterios ambientales obtenidos por entropia	104
Tabla 35 Matriz normalizada de decisión TOPSIS LCA.....	104
Tabla 36 Matriz estandarizada de pesos TOPSIS LCA	105
Tabla 37 Soluciones ideales positivas y negativos.....	105
Tabla 38 Distancia entre soluciones ideales positivas y negativas	105
Tabla 39 Solución relativa ideal y ranking ambiental	106
Tabla 40 Comparación entre ranking de metodos multicriterio	107
Tabla 41 Correlacion de Spearman	107
Tabla 42 Resultados de calculos del mecanismo piñon cremallera	109
Tabla 43 Pesos y capacidades de Aveo family.....	110
Tabla 44 Caracteristicas del chasis del auto	111

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Tabla 45 Relación entre tamaño del piñon y radio de giro	112
Tabla 46 Datos para calculos y simulacion SAE 4340	115
Tabla 47 Datos para calculos y simulacion SAE 1045	121

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Índice de anexos

Anexo A. Planos de piñon cremallera en inventor	143
Anexo B. Propiedades del piñón y cremallera	145
Anexo C. Vida util de productos tecnologicos	147
Anexo D. Propiedades de materiales seleccionados	148
Anexo E. Software ANSYS 2020 R2.....	151

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Abreviaturas

C.A.D.	Computer Aided Design (Diseño asistido por computadora)
C.A.E.	Computer Aided Engineering (Ingeniería asistida por computador)
LCA	Life Cycle Assesment (Análisis de ciclo de vida
MCDM	Multicriterial decisión Methods (Métodos de decisión multicriterio)
SAE	Society of Automotive Enginnering (Sociedad de ingenieros automotrices)

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Resumen

En este trabajo se presenta la selección y simulación de un material sostenible para el mecanismo piñón cremallera de una barra de dirección, siendo el elegido un material sustentable en el tiempo y el que causa menor impacto al ambiente durante todas sus etapas de vida, al mismo tiempo este material cumplirá las exigencias técnicas y económicas del diseño. Para lo cual se utilizó una metodología de toma de decisiones multicriterios (MCDM) combinado con el método de evaluación del ciclo de vida (LCA) para así obtener el mejor material tomando en cuenta su impacto ambiental y sus propiedades mecánicas y físicas. Luego de aplicar los métodos multicriterio y el análisis de ciclo de vida, se comparan los resultados de cada método entre si y se determinó que la mejor opción de material es el acero SAE 4340 que presenta propiedades mecánicas suficientes para soportar los esfuerzos por flexión y desgaste a los que está sometido el mecanismo piñón cremallera con un factor de seguridad dentro de los parámetros aplicados a este tipo de sistemas y por otro lado al ser un acero de bajo carbono en el análisis de ciclo de vida presenta un porcentaje menor de consumo de energía y emisiones de CO₂ anualmente, por lo que causa un menor impacto al ambiente durante su ciclo de vida. Mediante la simulación del material seleccionado en el software ANSYS que permite mediante la importación del modelo del mecanismo desarrollado en el software INVENTOR, colocar las propiedades mecánicas del material y establecer las condiciones de frontera necesarias para el análisis del comportamiento del material en el funcionamiento del mecanismo piñón cremallera. Los resultados de la simulación fueron validados encontrando el esfuerzo de flexión máximo de Von Mises igual a 405,38 MPa obteniendo un factor de seguridad igual a 2,41, y aplicando las fórmulas para engranes de la norma AGMA. La metodología IEM-TOPSIS aplicada para obtener los

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

rankings ayuda a evitar la subjetividad de la elección de un material y hacer que se ajuste a parámetros reales, y los valores obtenidos en la combinación de los métodos multicriterio y en la simulación, se puede decir que el presente trabajo es una metodología válida para la selección de materiales en la industria automotriz.

Palabras clave: Piñón-Cremallera, Metodología de decisión Multicriterio (MCDM), Evaluación del ciclo de vida (LCA), Selección de material, Modelado CAD, Simulación CAE, Acero, Huella de CO₂, Consumo energético, Entropía, Topsis

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Abstract

This work presents the selection and simulation of a sustainable material for the rack and pinion mechanism of a steering bar, being chosen a material that is sustainable over time and causes the least impact on the environment during all its life stages, at the same time This material met the technical and economic demands of the design. For this, a multi-criteria decision-making methodology (MCDM) combined with the life cycle assessment method (LCA) is required to obtain the best material taking into account its environmental impact and its mechanical and physical properties. After applying the multi-criteria methods and the life cycle analysis, the results of each method are compared with each other and the best material option was determined is SAE 4340 steel, which has specific mechanical properties to control flexural controls. And wear at which the rack and pinion mechanism is at some point with a safety factor within the parameters applied to this type of system and, on the other hand, being a low carbon steel in the life cycle analysis, it presents a lower percentage of energy consumption and CO₂ emissions annually, so it causes less impact to the environment during its life cycle. By simulating the selected material in the ANSYS software that allows by importing the model of the mechanism developed in the INVENTOR software, to place the mechanical properties of the material and establish the boundary conditions necessary for the analysis of the behavior of the material in the operation of the mechanism rack pinion. The simulation results were validated by finding the maximum bending stress of Von Mises equal to 405,38 MPa, obtaining a safety factor equal to 2.41, and applying the formulas for the AGMA standard graphs. The entropy methodology applied to obtain the rankings helps to avoid the subjectivity of the choice of a material and to make it adjust to real parameters, and the control values in the combination of multicriterial methods and in the simulation, it can be

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

said The present work is a valid methodology for the selection of materials in the automotive industry.

Keywords: Rack-and-pinion, Methodology (MCDM), Life Cycle Assessment Method (LCA), Material Selection, CAE Simulation, Steel, CO₂ Footprint, Energy Consumption, Entropy, Topsis

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Introducción

Antecedentes

Actualmente en un mundo con recursos limitados, crecimiento poblacional acelerado y viviendo una crisis económica la preocupación de la sociedad por los problemas de sobrexplotación, el consumo desmedido de los recursos naturales y el impacto ambiental que esto conlleva ha cobrado mayor importancia con el tiempo, las empresas automotrices han apostado por un cambio hacia un desarrollo sostenible para la fabricación de nuevos productos y materiales que representen un menor impacto al medio ambiente y los ecosistemas naturales y más aún en la industria automotriz que genera una gran cantidad de emisiones de CO₂ hacia el ambiente.

El uso de materiales sostenible se ha vuelto una tendencia a nivel mundial y el desarrollo sostenible apareció como respuesta a los impactos sociales y ambientales negativos del desarrollo económico desenfrenado. La industria automotriz contribuye significativamente al consumo de recursos energéticos y emisiones contaminantes al medio ambiente perjudicial. (Ma et al., 2018a)

El principal componente de los automóviles es el acero y sus aleaciones, existe una percepción histórica de que la industria del acero es una industria contaminante y demandante de energía, pero eso ha cambiado mucho. Por supuesto, la producción de acero requiere mucha energía, pero los beneficios que obtiene de los aceros modernos durante todo el ciclo de vida superan con creces esta inversión inicial en energía. (Risk, 2020)

El día de hoy, la normativa del control de emisiones penaliza a aquellas instalaciones que no cumplen con los estándares y son ineficientes, bien sancionándolas o bien porque

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

tengan que comprar derechos adicionales para emitir CO₂, trasladándose de esta forma el problema ambiental a la economía de las empresas. (Rue y Lopez et al., 2019)

Se estima que la industria del acero genera el 6,7% de las emisiones de gas de efecto invernadero. Las emisiones de la siderurgia basada en hornos eléctricos de arco son mucho menores que las de las plantas con altos hornos y acería al oxígeno. Las acerías eléctricas representaban en 2013 el 29% de la producción mundial de acero, pero solo el 15% del consumo de energía y el 13% de las emisiones de CO₂. (Madias, 2017)

El Ciclo de Vida de un producto es un proceso que va desde la Cuna Hasta la Tumba del mismo. En la figura 1 se muestra una mina a cielo abierto, ejemplificando el Life Cycle (LC) del acero, primero el mineral extraído debe ser triturado y luego enriquecerlo en su contenido del metal deseado (concentración). Ese concentrado se procesa para obtener el metal no combinado y llevarlo a fundición.

Se lo funde utilizando un gran consumo de energía, se agregan los elementos aleantes y se producen las láminas, ejes extruidos o lingotes, pero ya en el sólo hecho de tener que transportarlo, también se consume energía. El transporte va desde buques de carga, vehículo de motor diesel, o cualquier medio que utilice combustible, tenemos contaminantes (gases de escape). En la fabricación de los lingotes, planchas, ejes y de cualquier otro elemento, también existe consumo de energía y de recursos naturales. (Ciclo de vida, 2017)

Con el tiempo han aparecido distintos aportes a esta metodología, entre los que cuentan, además del Código de prácticas para LCA publicado por la SETAC en 1993, la Guía Nórdica para LCA de 1995. Hacia 1997 la Organización Internacional de Normalización (ISO) publica

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

un conjunto de Normas ISO 14040 y 14044 dedicada a la problemática ambiental. (Carabaño et al., 2014)

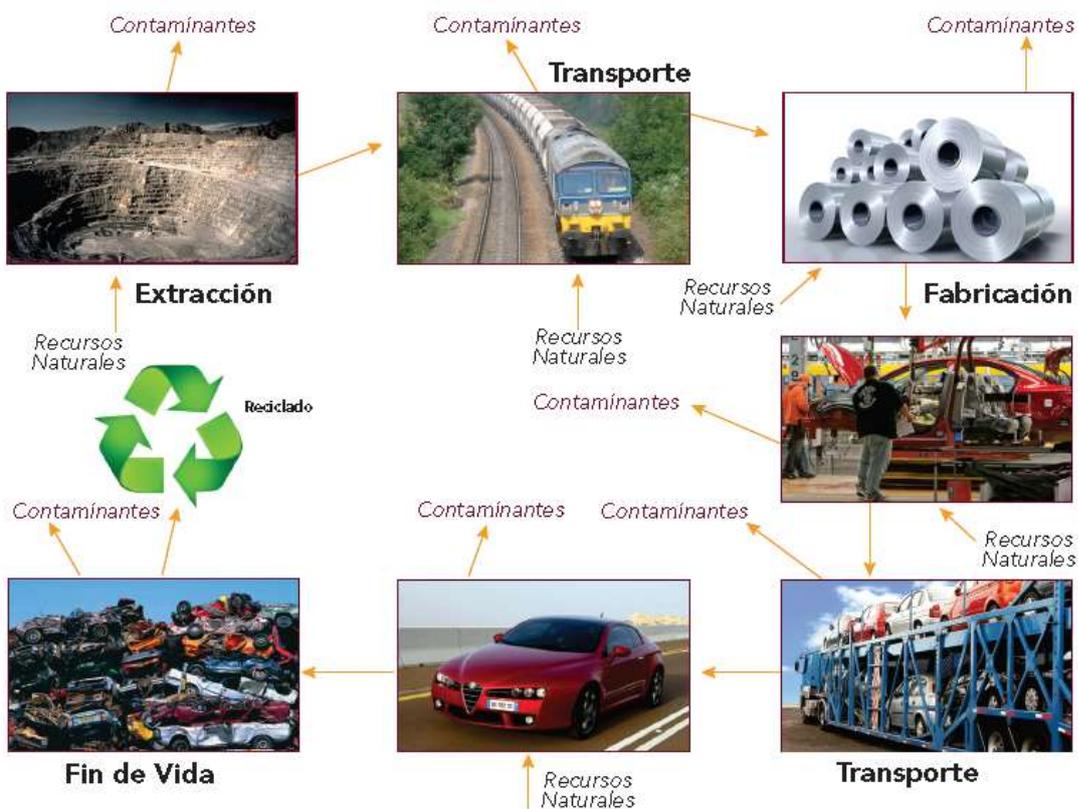


Figura 1. Ciclo de vida del Acero (Ciclo de vida, 2017)

Problemática

Se puede decir que el elemento que marca la diferencia entre el Diseño para la sustentabilidad y el diseño tradicional es el análisis de ciclo de vida (LCA). Sólo comparando los perfiles ambientales de dos diseños diferentes es posible definir por qué y en qué magnitud uno puede superar a otro. El LCA, es entonces una técnica útil tanto para el rediseño, como para la innovación.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

El estudio dedicado al Análisis del Ciclo de Vida (LCA) busca instalar y dar relevancia a este concepto ya que es la piedra angular para el desarrollo de las metodologías de Ecodiseño y Diseño Sustentable. Las técnicas asociadas se fundamentan en una visión ampliada que considera los impactos durante toda la vida del producto. A lo largo de él se considera genéricamente a un producto como el resultado de un proceso. *(Análisis Del Ciclo de Vida (ACV) / Life Cycle Analysis (LCA) | Andaltec, 2013.)* (Ciclo de vida, 2017)

El objetivo del LCA es comparar los daños ambientales globales asignables a productos y servicios para poder determinar aquellos que son menos perjudiciales. (Ciclo de vida, 2017) (Rieznik y Hernández, 2005)

Los estudios de LCA han ayudado a Tata Steel a comprender cómo funciona el acero en comparación con otros materiales como aluminio, concreto, madera y fibra de carbono al demostrar sus atributos ambientales. Tata Steel utiliza los estudios de LCA como una herramienta de marketing para respaldar sus cadenas de suministro. El equipo de sostenibilidad de Tata Steel proporciona asistencia técnica e información a los equipos de ventas y marketing de Tata Steel para ayudar a los clientes con datos sobre la sostenibilidad del acero en su proyecto. (Risk, 2020)

Los fabricantes de automóviles invierten en mejorar sus productos y cumplir con las normas y estándares de protección del medio ambiente mediante el desarrollo de nuevas soluciones para disminuir el consumo de combustible, el ruido y las emisiones tóxicas, aumentar la reciclabilidad, etc.

Para cumplir con cada régimen de emisiones permitidas, las compañías automotrices han invertido considerables recursos de investigación y desarrollo para crear nuevas tecnologías

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

de control de combustión, se incluyen elementos como sistemas de inyección directa de combustible, software de mapeo de motores y sistemas de dirección autónomos y sistemas de admisión de aire variable. (Delogu et al., 2018)

Justificación

En la industria automotriz es de gran importancia y representa una tarea crítica la selección de materiales ya que el material seleccionado para una aplicación particular deberá cumplir con distintos tipos de exigencias y propiedades dependiendo de la aplicación o del trabajo a realizar, además de cumplir con los requisitos de diseño y económicos, se busca que los materiales utilizados sean los que menor impacto causen al medio ambiente, el proceso de selección debe tener en cuenta una amplia gama de factores: restricciones de forma y dimensión, rendimiento requerido, limitaciones tecnológicas y de manufactura de materiales, impacto ambiental de todas las fases del ciclo de vida.

El material sostenible es un tipo de material que tiene como objetivo satisfacer las necesidades humanas, mientras que tiene efectos mínimos en el medio ambiente, no solo en el presente, sino en el futuro indefinido (Ma et al., 2018a).

En su estudio Fontana y Muñuzuri, resaltan la importancia de la toma de decisiones que ha dado lugar a su estudio desde un punto de vista más operativo a la aparición de diversas metodologías que nos ayudan mediante procesos matemáticos relativamente sencillos, a resolver estos problemas. Es aquí donde se encuentran los métodos de decisión multicriterios, sistemas creados a priori para usarse por un grupo de expertos en una determinada materia para satisfacer o solucionar un problema y disponen de diversas alternativas para hacerlo. (2015)

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Los MCDM buscan como método ser una herramienta capaz de apoyar la toma de decisiones por medio de la jerarquización de los criterios más importantes de la decisión y las alternativas a seleccionar. Dichos criterios, pueden ser medidos tanto de forma cuantitativa como de forma cualitativa buscando en todo momento la mejor alternativa con el fin de cumplir el objetivo específico como se ve en la figura 2.(Aplicación y Gutiérrez-Bucheli, 2014)

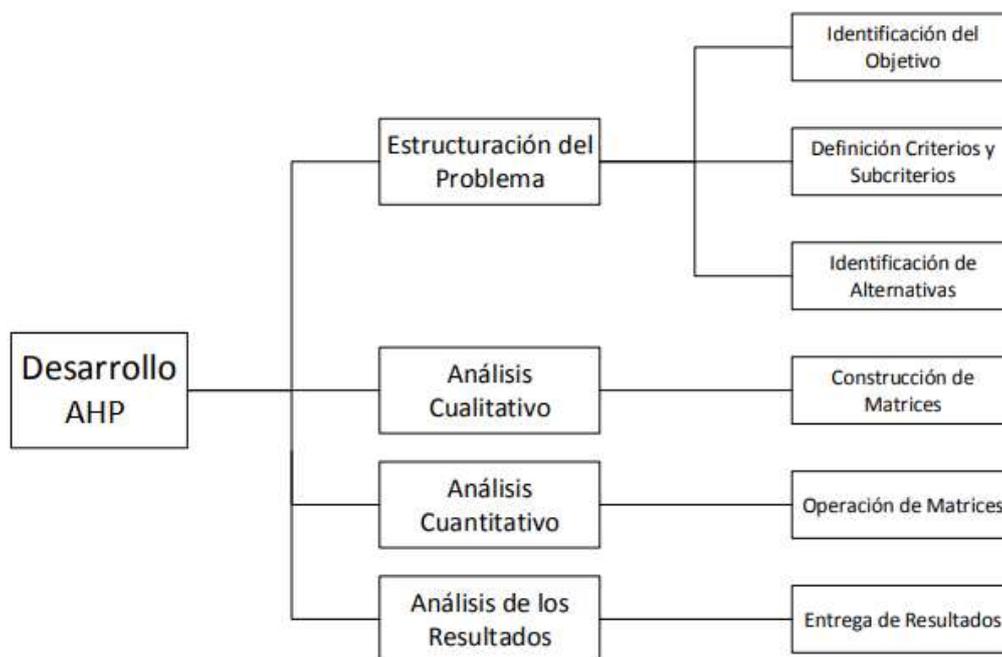


Figura 2. Metodología para desarrollo de AHP (Aplicación y Gutiérrez-Bucheli, 2014)

La selección de materiales para el diseño de ingeniería necesita una comprensión clara de los requisitos funcionales para cada componente / producto individual y también se deben considerar varios criterios importantes. Una selección inadecuada puede afectar negativamente el funcionamiento, la productividad, la rentabilidad y la vida útil de una máquina o producto. (Giudice et al., 2005)

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Además, el universo de materiales cada vez mayor, cada uno con sus propias características, aplicaciones, ventajas y limitaciones. Se observa que los objetivos y criterios en el proceso de selección de materiales a menudo están en conflicto entre sí, e implica compensaciones entre factores decisivos, como propiedades deseadas, entorno operativo, proceso de producción, costo, valor de mercado, disponibilidad de fuentes de suministro y rendimiento del producto. (Aziz et al., 2016)

Por lo tanto, el proceso de selección de material puede considerarse como un problema de toma de decisiones de criterios múltiples (MCDM). Y es necesario un enfoque sistemático y eficiente para la selección de materiales con el fin de seleccionar la mejor alternativa para una aplicación de ingeniería dada. (Vaca et al., 2020)

Por esta razón, la complejidad de las decisiones debe ser sometida a un análisis riguroso con el fin de obtener un claro panorama de los diferentes escenarios resultantes de un proceso específico de decisión. En otras palabras se deberá analizar en conjunto los múltiples resultados que pueden surgir y a su vez de forma individual cada uno de estos con el fin de generar una decisión enfocada en alcanzar el objetivo que se desea cumplir por medio de la alternativa seleccionada. (Aplicación y Gutiérrez-Bucheli, 2014)

El proceso de toma de decisiones depende de diversos criterios. En muchos casos, para tomar una decisión, es tenido en cuenta un solo criterio lo cual puede representar que se están dejando de lado factores importantes para la decisión, al igual que una decisión tomada basándose en interpretaciones subjetivas. Con el fin de disminuir la subjetividad y ampliando el conocimiento alrededor de un problema específico, se desarrollan modelos capaces de soportar decisiones que se basan en múltiples criterios. (Agarski et al., 2012)

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

La idea base de involucrarse desde el diseño industrial en estos temas es entender el perfil de impactos en el tiempo en cada etapa, de manera de tener una orientación sobre en qué aspectos del producto vale más la pena concentrar nuestros esfuerzos de Diseño (o rediseño). (Carabaño et al., 2014)

En la primera parte se analiza la aplicación de métodos multicriterio (MCDM) dando importancia al enfoque en la selección de materiales para la industria automotriz, que tomen en cuenta criterios tradicionales de diseño tanto como ambientales. También se revisaran estudios que abordan la problemática de la selección de materiales empleando el software CES Edupack que es una importante biblioteca que recopila información sobre materiales y procesos y tratamientos industriales y la metodología Ashby.

A continuación se desarrollarán los métodos multicriterios para evaluar un grupo de materiales elegidos con la ayuda del CES Edupack y revisando catálogos de materiales para engranes. Se realizara el análisis multicriterio teniendo en cuenta los criterios beneficiosos y no beneficiosos para la evaluación. Se aplicaran el método de entropía, desviación estándar y variación estadística para obtener los pesos de cada criterio, se compararan los 3 métodos y se elegirá el mejor para combinarlo con la metodología TOPSIS, VIKOR y COPRAS para obtener un ranking por cada uno y compararlos entre sí.

Para la evaluación del ciclo de vida de cada material se empleara la herramienta Ecoaudit de CES Edupack, que permite ingresar datos de; tipo de material, transporte, utilización, reciclabilidad entre otra información para obtener indicadores de CO₂ y consumo energético, estos valores servirán para obtener un ranking ambiental del grupo de materiales,

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

incluir este en la comparación de rankings, analizar los resultados y elegir la mejor opción, para simular mediante el software ANSYS su comportamiento.

Objetivo General

Seleccionar el mejor material sostenible para el mecanismo piñón cremallera de la barra de dirección de un automóvil aplicando métodos multicriterios (MCDM) combinados con una metodología de análisis de ciclo de vida (LCA) y simulación del material elegido mediante software CAD/CAE

Como se ha discutido antes la incorporación de la evaluación ambiental en la fase inicial de diseño en un componente del vehículo se presenta como un desafío importante que los fabricantes de automóviles deben enfrentar para desarrollar soluciones de diseño más sostenibles por lo que el objetivo del presente estudio es aplicar los métodos de decisión multicriterio para el desarrollo de una metodología sistemática que introduzca consideraciones ambientales y tradicionales de diseño en la selección de materiales utilizados en los componentes automotrices, que cumpla con los requisitos funcionales y de rendimiento, al tiempo que minimiza el impacto ambiental asociado con todo el ciclo de vida del producto, y simulación del material elegido mediante el software ANSYS en un mecanismo piñón cremallera.

Objetivos Específicos:

1. Determinar los criterios de evaluación ambientales para los elementos a estudiar y materiales a comparar mediante la metodología de análisis de ciclo de vida (LCA).

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

2. Comparar los resultados del análisis de ciclo de vida de cada material, para establecer el ranking ambiental de los materiales candidatos.
3. Aplicar los métodos multicriterios adecuados para establecer el peso de los criterios y ranking de los materiales de estudio y no tener distorsiones en el resultado.
4. Realizar un análisis del material mediante simulación por elementos finitos para la validación del funcionamiento del material sostenible obtenido por la metodología MCDM Y LCA.

El procedimiento de selección propuesto recolecta datos sobre las propiedades convencionales y ambientales de los materiales y procesos, relaciona estos datos con el rendimiento requerido de los componentes del producto y elige una opción por la cuantificación del impacto ambiental durante todo el ciclo de vida. (Yousefi y Hadi-Vencheh, 2010)

A partir de este estudio que combina métodos de elección multicriterio con un análisis de ciclo de vida (LCA) en la selección de un material, se podrá aplicar el mismo al diseño, construcción e implementación de sistemas de engranes y demás piezas mecánicas, sobre todo en la industria automotriz y demás tipo de industria como la construcción, agrícola, transporte pesado, pesquera, ya que este tipo de mecanismos de transmisión se utiliza en prácticamente todos los campos de la industrial, siendo un aporte para de diseño de un material sustentable.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Estado del Arte

Estudios previos relacionados con la aplicación de metodología multicriterio y el análisis del ciclo de vida

En el siguiente apartado se presenta un recuento de algunos estudios relacionados con la selección de materiales para piezas de la industria automotriz aplicando multicriterios, análisis de ciclos de vida de productos con enfoque en los automóviles y estudios de simulación de mecanismos piñón cremallera.

Como se ha dicho antes de los principales desafíos de la industria automotriz es la integración del ecodiseño o la integración de materiales sostenibles en el diseño conceptual del automóvil, Delogu (2018) aborda el tema con un caso de estudio de aligeramiento de peso, el objetivo de este estudio es discutir las principales barreras para modelar e integrar el desempeño ambiental del producto en el diseño del concepto automotriz, la evaluación del ciclo de vida es la metodología más extendida para la evaluación ambiental y la comparación de alternativas. Se combina dicha metodología con el procedimiento de diseño tradicional en dos fases de diseño de componentes, la elección del material y el diseño conceptual. El enfoque combinado para el diseño efectivamente permite la integración la problemática ambiental en los procedimientos establecidos de la compañía. Aunque, la interpretación de los resultados es un aspecto desafiante debido a los elementos contradictorios inevitables que no deberían desalentar el desarrollo de una evaluación integral de sostenibilidad dentro de la etapa inicial de diseño.

El trabajo realizado por Ungureanu (2004) presentan un estudio comparativo del ciclo de vida y costo del aluminio vs el acero en la fabricación de partes automotrices, tomando como

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

objeto de estudio el panel exterior de un vehículo siendo este elemento una parte del auto donde se puede lograr una importante reducción de peso, además, se cuantifica el impacto ambiental durante la vida útil del vehículo. El estudio concluye que teniendo en cuenta el ciclo de vida completo de un automóvil, desde la extracción de materiales hasta la disposición final, incluidas las etapas de reciclaje y reutilización, el aluminio puede ser una alternativa potencial para los aceros en futuras aplicaciones automotrices.

Otro estudio que aborda el tema del Ecodiseño es el realizado por Yousefi y Hadi-Vencheh (2010), este documento, propone un modelo integrado a partir de las técnicas de toma de decisiones de criterios múltiples más importantes y utilizables (MCDM), que significa proceso de jerarquía analítica (AHP) y técnica para ordenar preferencias por similitud con la solución ideal (TOPSIS), para evaluar la industria automotriz tomando como prueba distintos modelos de automóviles y su desempeño en el país de Iran. Se realiza una selección de criterios tomando en cuenta estudios de investigación previos, mecánicos expertos, vendedores de autos y datos de fabricantes. Los criterios son de carácter técnico, seguridad y estéticos, se evalúa y relacionan entre si las especificaciones del motor, velocidad, marca, color, diseño interno, país de procedencia, consumo de combustible, disponibilidad de repuestos entre otras y al final se comparan los resultados obtenidos de la aplicación de los MCDM en este conjunto de datos.

(Fernandez et al., 2010) realiza un estudio de selección de un material con potencial para almacenar energía térmica, sabiendo que el universo de materiales para ingeniería crece cada día, Los autores utilizan una metodología desarrollada por el Ing. Ashby de la universidad de Cambridge con la base de datos del software CES Edupack donde hay una gran lista de materiales para ingeniería, se puede ver desde procesos, propiedades, comportamiento

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

mecánico, precio, disponibilidad, reciclabilidad, Huella de CO₂, etc. Los materiales sensibles al almacenamiento de calor se definen como un grupo de materiales que se encuentran bajo el cambio de la mono-fase en el rango de temperatura del proceso de almacenamiento, después seleccionar los criterios a evaluar. Con la ayuda del software se selecciona el mejor material de un universo de más de 150.000. En este caso es un material que debe almacenar energía térmica por lo que se va reduciendo opciones de materiales candidatos teniendo en cuenta la capacidad calórica, densidad, conductividad térmica, calor específico, resistencia a la fractura y costo, y contrastando unas con otras para al final del estudio se discutir los resultados elegir un material que satisfaga los requerimientos solicitados.

En un estudio sobre selección de material para una caja de cambios de una camioneta Chevrolet Dmax se propone un análisis de un grupo de materiales, para elegir la mejor opción se aplican los métodos multicriterios considerando criterios de diseño tradicionales.(Vaca et al., 2020) utiliza el método de entropía para asignar un peso o valor a cada criterio considerado, estos valores combinándolos con las metodologías TOPSIS; VIKOR y PROMETHEE se utilizan para obtener 3 rankings de materiales, el material elegido es el acero 4140, que es un acero aleado para la construcción de máquinas, ejes, engranes entre otras aplicaciones, los datos de este material se simulan mediante el software ANSYS en un mecanismo de engranes helicoidales, y los valores obtenidos se comparan con los ensayos realizados al acero de fábrica de la caja de cambios y se discuten los resultados.

Martinez y Toledo, expresan que al realizar el análisis multicriterio, se tiene un material alternativo para la punta de eje trasero, el cual cumple satisfactoriamente los requisitos que debe tener el elemento y al utilizar un catálogo de una casa que suministra aceros (IVAN BOHMAN), se observa que la descripción del acero AISI 5115 encaja completamente para

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

esa aplicación. Esta descripción dice: “Es un acero aleado para cementación, con un núcleo de alta resistencia. Se utiliza para casos donde se requiere alta dureza y resistencia al desgaste superficial, combinado con buena tenacidad del núcleo” y para esto los MCDM son herramientas importantes y acertadas a la hora de tomar una decisión, en la cual interfieren varios criterios, y que estos no poseen demasiada diferencia entre sus criterios. (2019)

Otro similar es presentado por (Salazar-Loor et al., 2019) en la elección de un material para la parte lateral estructural de un vehículo, con el objetivo de obtener una mayor eficiencia y rendimiento en el aprovechamiento de materiales, se utiliza el CES Edupack para elegir los materiales, se establece límites de costo, maquinabilidad y resistencia para reducir el universo de materiales, se eligen 5 materiales, establecen los criterios de evaluación para proceder a aplicar los métodos multicriterios TOPSIS, VIKOR, COPRAS y PROMETHEE, comparar los resultados y elegir un acero martensítico YS1200 que presenta las propiedades necesarias para aplicarse a la parte lateral de una estructura automotriz.

En la selección de un material alternativo para un disco de frenos utiliza los métodos multicriterios; COPRAS, VIKOR, ELECTRE, ARAS Y MORA con 5 opciones de materiales y 9 criterios de evaluación, después de comparar los resultados del ranking de cada método el material elegido es un acero A536 que es la mejor opción en 2 de los 5 métodos y el segundo material más oprimado es la aleación de aluminio Al 10 Si C. Los métodos utilizados en este y otros estudios han mostrado ser de gran utilidad en la selección de materiales, por lo que serán aplicados de una forma similar en el presente trabajo con la novedad de que se realizara un ranking ambiental que considere criterios ambientales de los materiales a lo largo su ciclo de vida, estableciendo una metodología de selección de materiales sostenibles que contemple

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

tanto criterios ambientales como tradicionales de diseño de la cuna a la tumba del producto.

(Martínez Gómez et al., 2018)

Con el fin de comprobar los resultados de la aplicación de los métodos multicriterio en la selección del material sustentable para el mecanismo piñón cremallera, es necesario la utilización de varios softwares para graficar la geometría del piñón y la cremallera darle las propiedades del material seleccionado y posteriormente simular la aplicación de las fuerzas que actúan en el funcionamiento del mecanismo.

En la actualidad, la modelización y la simulación es una actividad indispensable cuando nos enfrentamos con el análisis y diseño de sistemas multi disciplinares de cierta complejidad. El objetivo es ayudar o dar el soporte necesario durante el proceso de diseño, análisis y diagnóstico de sistemas ingenieriles. El software debe complementar el talento del diseñador para que éste pueda modelar y simular de forma lo más eficientemente posible. El software hace posible establecer una valoración final antes de que los sistemas sean construidos, y pueden aliviar la necesidad de experimentos caros y dar soporte a todas las etapas de un proyecto desde el diseño conceptual, pasando por el montaje hasta llegar a su funcionamiento. (Cataluña, 2004.).

Se utilizan dos tipos principales de sistemas de dirección en automóviles modernos y camiones ligeros: el sistema de cremallera y piñón y el sistema de dirección convencional o de enlace de paralelogramo. En los automóviles, el sistema convencional era el único tipo utilizado hasta la década de 1970. Ha sido reemplazado casi por completo por una dirección de piñón y cremallera. Kulkarni et al., (2017) en su trabajo realiza la simulación de 4 materiales distintos en un mecanismo piñón - cremallera y compara los resultados, los

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

materiales son: acero 4340, acero al carbono, caucho (rubber) y bronce, concluyendo que los en acero al carbono y el acero 4340 son adecuados para la fabricación de mecanismo.

Shinde et al., (2017) en su artículo analiza en primer lugar, las características de un sistema de piñón y cremallera centrado principalmente en las tensiones de flexión y contacto del piñón y la tensión de flexión de cremallera mediante análisis de elementos finitos. Para estimar la tensión de contacto, con el software SolidWorks se genera el modelo sólido para diferentes materiales y la solución numérica se realiza con ANSYS, que es un paquete de análisis de elementos finitos. La investigación analítica se basa en la fórmula de estrés de Lewis. Este artículo también considera el estudio de las tensiones de contacto inducidas entre dos engranajes. El método actual para calcular la tensión de contacto del engranaje utiliza la ecuación AGMA. Para determinar las tensiones de contacto entre dos engranajes de acoplamiento, el análisis se realiza en los cilindros de contacto equivalentes. Los resultados obtenidos de ANSYS se presentan y comparan con valores teóricos.

Agrawal et al., (2017) en su trabajo “Diseño del sistema de engranaje de dirección en automóvil de pasajeros: una revisión “, recalca la importancia en la selección del material. Los materiales utilizados en el sistema de dirección apuntan a operaciones precisas y componentes livianos. Aunque la precisión y el peso son las principales prioridades, también se consideraron el costo, la capacidad de fabricación y la confiabilidad. La precisión en el sistema de dirección se deriva de altas tolerancias de fabricación y una deflexión mínima. De entre 3 materiales se elige el acero 4140, y se simula en el software ANSYS, obteniendo valores de deformación total, estrés equivalente y factor de seguridad, para comprobar el comportamiento del material en el mecanismo.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Método

Tipo de metodología

Para el desarrollo este proyecto se utilizara una metodología de investigación descriptiva analítica, ya que se seguirá un procedimiento combinando métodos de selección Multicriterio con un análisis de ciclo de vida a fin de establecer el mejor material para el mecanismo piñón – cremallera tomando en cuenta criterios de diseño técnicos y ambientales para hacerlo.

Seguido de una metodología analítica de los datos obtenidos y una simulación mediante el uso de un software CAD/CAE del material seleccionado para determinar el desempeño del material elegido y analizar su comportamiento bajo condiciones de trabajo simuladas.

Por otro lado, uno de los objetivos del diseño de cualquier vehículo es buscar la suficiencia y autonomía de la conducción, una manera de conseguir esto es reduciendo el consumo de combustible, un factor importante que influye sobre esto es el peso, si se consigue aligerar la masa de los componentes del vehículo, la cantidad de combustible necesaria para producir la energía suficiente para desplazarlo será menor, traduciéndose como un ahorro económico en la actividad de la conducción, además de contribuir a la reducción de emisiones nocivas sobre el medio ambiente. (Salazar-Loor et al., 2019)

Entonces para una correcta selección del material se debe obtener resultados validos a través de la aplicación de fórmulas de los métodos antes mencionados, tablas comparativas, ranking de materiales, valores de criterios preestablecidos con el fin de compararlos y analizar dichos resultados se puede decir que también se trata de un estudio de metodología cuantitativo- estadístico.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

A continuación en la figura 3 se explica de forma más sistematizada la metodología a seguir en la selección del mejor material mediante un diagrama de procesos que conjuga el análisis de ciclo de vida, la metodología de decisiones Multicriterio, el diseño CAD y la simulación mediante un software en la selección de un material sostenible para el sistema piñón – cremallera.

Esquema de la metodología a seguir

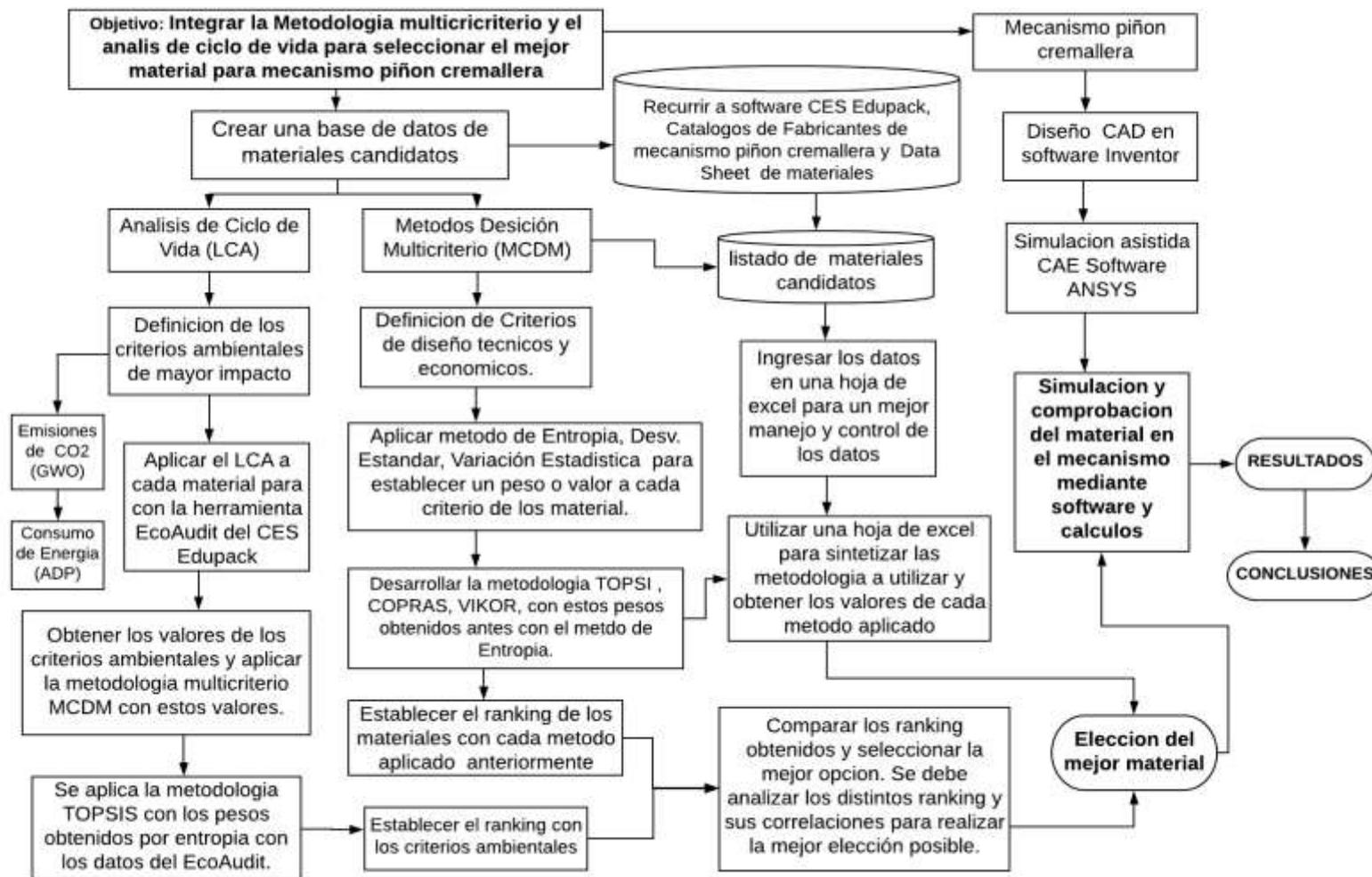


Figura 3. Esquema de la metodología

Importancia del sistema de dirección en un automóvil

El sistema de dirección en un automóvil tiene un rol relevante y de gran importancia en el funcionamiento del mismo ya que es responsable de llevar el rumbo del vehículo en la dirección requerida por el conductor de una manera confiable y segura.

Todos los sistemas de dirección contienen varias partes comunes. Cada sistema de dirección, sin importar el tipo, tendrá un volante, un eje y una columna de dirección, uniones universales, barra de dirección y brazo de dirección, como se ve en la figura 4.(Shinde et al., 2017)

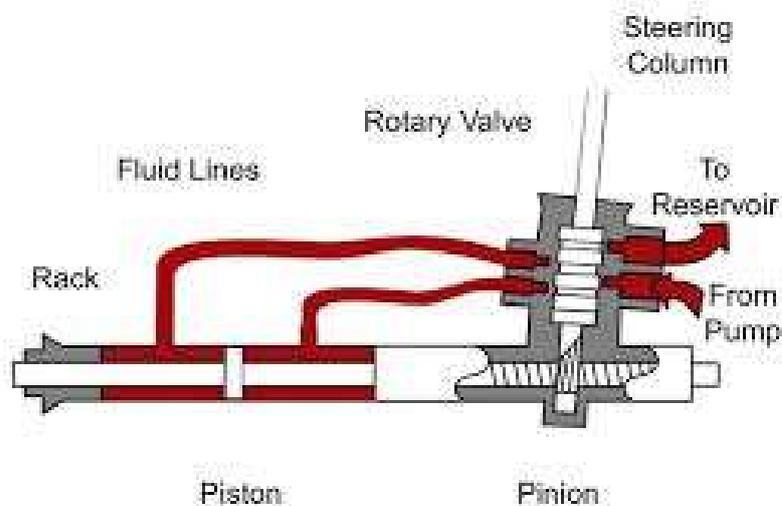


Figura 4. Sistema de dirección (Hlaing et al., 2017; *Rack & Pinion In This Presentation*, 2017.)

Se utilizan dos tipos principales de sistemas de dirección en autos modernos y camiones ligeros: el sistema de cremallera y piñón y el sistema de dirección convencional o de enlace de paralelogramo. En los autos, el sistema paralelogramo era el único tipo utilizado hasta 1970, sin embargo ha sido reemplazado casi por completamente por una dirección de piñón y cremallera. (Automotive, 2012.)

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Qué sucede durante una maniobra de giro de la dirección

Al momento que el conductor gira el volante, transmite una fuerza hacia el eje de entrada de la caja de dirección. Una barra de torsión que esta fija por un extremo al eje de entrada y por el otro extremo al eje del tornillo sinfín, gira junto con el eje de entrada y ejerce una fuerza rotatoria sobre el eje sinfín. En respuesta a esta fuerza rotatoria, el eje sinfín que actúa a través del mecanismo de balines de recirculación, intenta mover el pistón de cremallera axialmente a través del barreno del cilindro de la caja. (Automotive, Cajas de dirección TAS.)

Mecanismo piñón – cremallera

En la figura 5 se observa el sistema de dirección tipo piñón y cremallera que es el más común en autos livianos, la industria automotriz busca reducir el peso de su vehículo para aumentar la velocidad, disminuir el consumo energético y las pérdidas por inercia. (Shinde et al., 2017)

La dirección de piñón – cremallera es un sistema simple que convierte directamente la rotación del volante en un movimiento en línea recta en las ruedas. El mecanismo de dirección consta de la cremallera, el piñón, la camisa y cojinetes de soporte relacionados. (Kulkarni et al., 2017)

Por lo que en este estudio se buscara encontrar un material sostenible para reducir el peso del mecanismo buscando una alternativa que lo optimice y económicamente sea una alternativa viable que satisfaga los requerimientos del trabajo a realizar.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

El accionamiento de la cremallera puede estar situado en un lateral o en el centro de la caja de dirección, así se puede montar también columnas de dirección de seguridad.(Velasco Sánchez et al., Sistemas de direccion.)

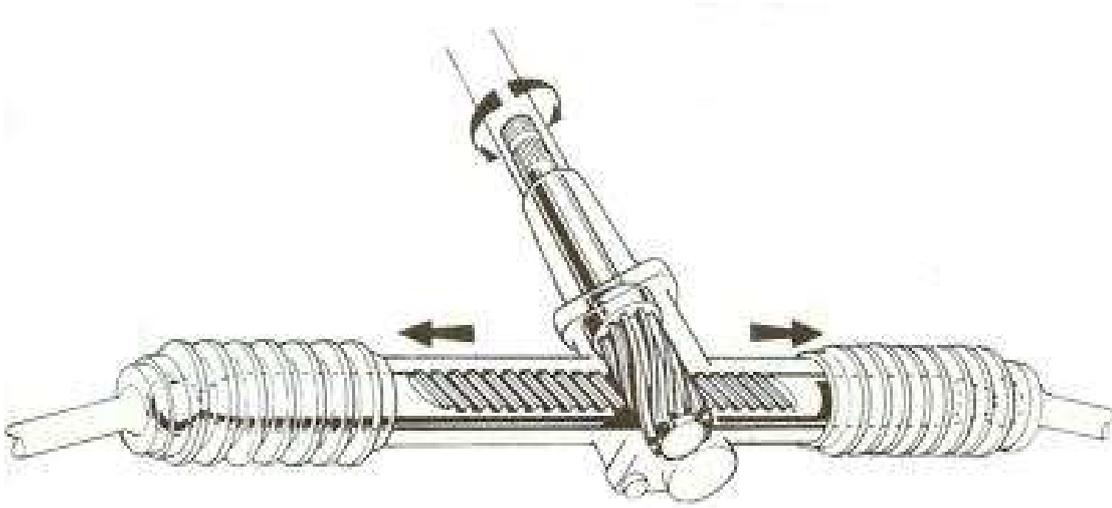


Figura 5. Mecanismo piñón – cremallera (Shinde et al., 2017)

Modos de falla en un engrane

Un engranaje falla cuando no puede realizar el trabajo para el cual fue diseñado. El modo de fallo más frecuente, según los expertos, es la fatiga, seguido por el impacto y el desgaste. Se efectuó un análisis en más de 1 500 casos estudiados los tres modos de fallos en los engranajes más frecuentes fueron: fatiga volumétrica del diente (32 %); impacto a flexión (12,5 %) y desgaste abrasivo del diente (10 %).(Eduardo et al., 2013)

En la figura 6 se puede ver un engrane que ha fallado. La falla del diente de engranaje se produce como consecuencia de varios factores, entre los que se encuentran: los inherentes a un trabajo correcto del engranaje, con el consiguiente desgaste con el tiempo de

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

funcionamiento, hasta los determinados por un funcionamiento defectuoso, ya sea por error de diseño de las características del diente, o mal montaje o ensamble, lubricación, etc.

Por tal motivo para el diseño de un engranaje, no solo se debe conocer todas las requerimientos de la transmisión a la que va destinado, como potencia, velocidad, sobrecargas, tiempos de funcionamiento, tipo de elemento motor o máquina accionada, choques, cambios de sentido de rotación, temperatura de trabajo, etcétera, sino que es esencial el conocimiento de las fallas, para la correcta conformación, elección del material y su posterior cálculo.(Eduardo et al., 2013)

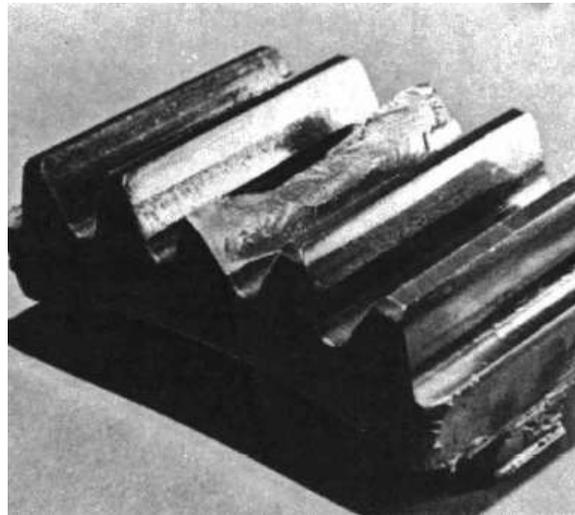


Figura 6: Falla en diente por picadura (Eduardo et al., 2013)

Criterios para la selección del material

Los engranes se pueden fabricar de distintos tipos de materiales que presenten las propiedades adecuadas según su aplicación o uso. Desde el punto de vista de diseño y técnico, la resistencia a la tracción, el límite elástico, la dureza, y una buena resistencia al desgaste, son las propiedades más importantes (Díaz, 2013).

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Se hace necesario establecer una lista de materiales candidatos para la elección del mejor material para el mecanismo piñón cremallera de la barra de dirección, al ser una pieza automotriz los parámetros técnicos que se tomaran en cuenta será: aligerar el peso, menor costo, y unas propiedades mecánicas mínimas de dureza, resistencia a la tracción, límite elástico, módulo de Young, porcentaje de elongación, resistencia a la fatiga, que satisfaga las exigencia del trabajo y garanticen su funcionamiento.

La industria mundial del acero ha definido ocho indicadores de sustentabilidad, que contemplan el desempeño ambiental, social y económico de la siderurgia. Los índices ambientales son las emisiones de CO₂ y la energía consumida por tonelada de acero producida, el porcentaje de materia prima convertida en productos y subproductos, y el porcentaje de empleados y contratistas incluidos en un sistema de gerenciamiento ambiental.

(PDF) Disminución de las emisiones de CO₂ de los altos hornos. (Madias, 2017)

Como se ve en la tabla 1 se establece también los criterios ambientales a tomar en cuenta que serán los más perjudiciales al medioambiente, a la salud y a la sociedad. El calentamiento global tiene como causante principal las emisiones de CO₂, por lo que este será uno de los criterios ambiental considerados que conjuntamente con el Consumo Energético del proceso del acero son los principales indicadores a tomar en cuenta a la hora de hacer un estudio del ciclo de vida del acero.

Tabla 1.
Criterio de evaluación de las Propiedades de material

Material	Precio (\$/kg)	Densidad (kg/m ³)	Módulo de young (gpa)	Límite elástico (mpa)	Resistencia a la tracción (mpa)	% Elongación	Dureza brinell (hbr)	Resistencia a la fatiga (mpa)	Huella de co2 (kg/año)	Energía consumida (mj/año)
	MIN ↓	MIN ↓	MAX ↑	MAX ↑	MAX ↑	MIN ↓	MAX ↑	MAX ↑	MIN ↓	MIN ↓

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Base de datos para la selección del material

Establecidos estos criterios a tomarse en cuenta en el presente estudio para seleccionar el material más adecuado para el mecanismo piñón cremallera, recurrimos a tablas de propiedades de materiales, catálogos de fabricantes piñón – cremallera, engranes, libros y un software para buscar los aceros más utilizados en este tipo de sistemas y sus propiedades que servirán para aplicar posteriormente los métodos de elección multicriterios.

El software CES Edupack será de gran utilidad para determinar las propiedades mecánicas y criterios ambientales a ser tomados en cuenta ya que es una biblioteca completa de materiales con sus propiedades en distintos niveles como se en la figura 7 y herramientas para reducir las opciones de materiales candidatos según el criterio del diseñador y así obtener una base de datos de los materiales candidatos más adecuados para material sostenible en el mecanismo piñón cremallera.

Se creara la base de datos con una preselección de 7 materiales aplicables para este estudio con sus respectivas propiedades mecánicas y ambientales para la aplicación de los métodos multicriterios y análisis del ciclo de vida. Como se ha mencionado anteriormente esta preselección se basa en los datos del software CES Edupack, catálogos de fabricantes de cremalleras, libros de diseño, catálogo de acero y sus aplicaciones.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

[inicio rápido](#) [★ novedades](#) [+ añadir base de datos](#) [↓ bases de datos adicionales](#)

Bases de datos

Básico



Figura 7. Bases de datos CES EduPack

Los engranajes, ejes de máquinas, herramientas mecánicas y muchos tipos de reductores de velocidad y transmisiones de movimiento para trabajo entre medio y pesado, por lo regular, se fabrican de acero al bajo carbono y medio carbono. Entre la amplia gama de aceros al carbono y aceros con aleación que se utilizan se pueden mencionar: AISI 1020, AISI 1040, AISI 1050, AISI 3140, AISI 4140, AISI 4150, AISI 4340, AISI 6150, AISI 8650, AISI 1045, AISI 5115, AISI 3415. (Díaz, 2013)

En un estudio realizado por Kulkarni et al., (2017) de diseño y simulación del mecanismo piñón cremallera para el sistema de dirección se estudian el acero 4140, Rayappa et al., (2017)

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

en otro estudio similar compara 3 materiales y elige al mismo acero como candidato para el mecanismo y realiza la simulación mediante ANSYS.

Según *TRANSMISIONES POR CREMALLERA PIÑÓN Cremalleras Introducción*, (n.d.) con el fin de satisfacer la demanda de la gran mayoría de sistemas de transmisión lineal por piñón cremallera, KOOM® presenta una completa serie de tipos y medidas en diversos materiales que combinándolos apropiadamente cumplen el objetivo deseado.

Las cremalleras, se fabrican con dentado templado en todas sus variantes, son acabadas por rectificado de todas sus caras con lo que se garantiza una excelente regularidad de engranaje y una transmisión del movimiento uniforme, silencioso y sin vibraciones.

Las cremalleras del catálogo se fabrican en tres tipos de materiales diferentes para satisfacer los distintos grados de prestaciones que pueden ser necesarios.

Tipo I: Material F-114 bonificado R=70 Kg/mm².

Tipo II: Material F-114 bonificado y templado por inducción HRC= 52

Tipo III: Material 18 NiCrMo5 (F-154) de cementación y temple HRC = 58-62

Selección por índices y diagrama de Pareto

Con la finalidad de reducir el número de materiales candidatos recurrimos al CES Edupack, la selección por índices es de utilidad para comparar las propiedades y estableciendo límites de resistencia mínimos, rango de precio, límite elástico, módulo de Young, porcentaje de CO₂, consumo energético entre otros.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

En la figura 8 se observa como en la pestaña “Gráfico/Seleccionar” del CES Edupack se tiene opción “Limite” donde se puede ingresar valores de propiedades generales y mecánicas, térmicas y más. De acuerdo a los criterios antes explicados en la tabla 1 y como se he visto en los estudios previos relacionados y catálogos, se busca un material con las siguientes características:

- Alta resistencia a la tracción (>500 MPa). ver figura 8
- Buena maquinabilidad. ver figura 9
- Precio no elevado (< 3,5 \$/kg), ver figura 10

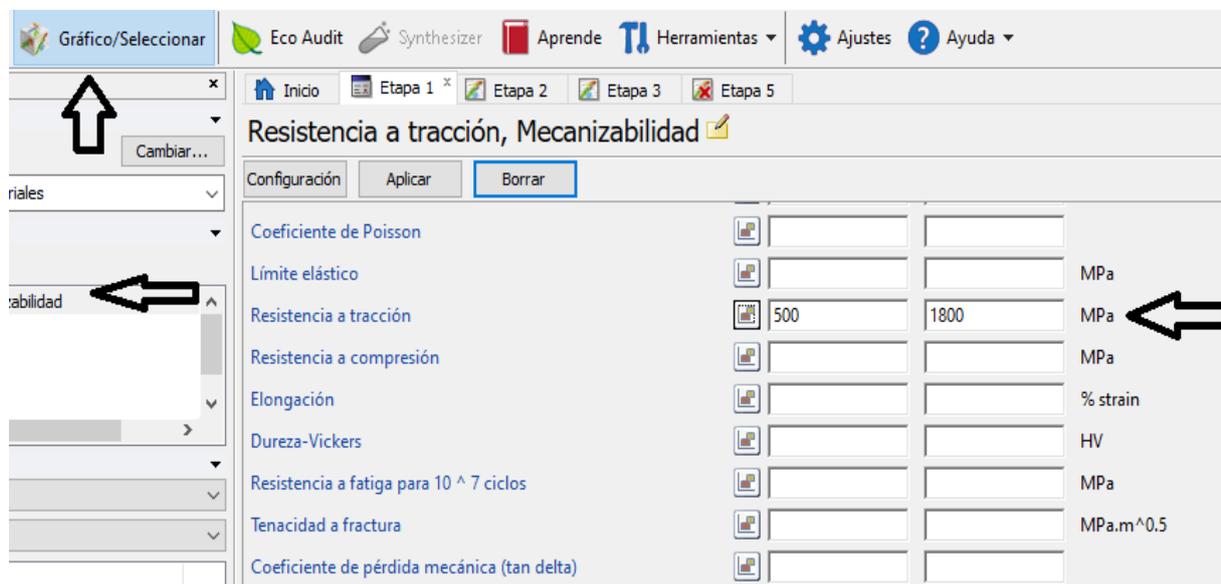


Figura 8. Limitante de resistencia a la tracción para la selección de materiales

El Software Edupack tiene una escala de maquinabilidad del 1 al 5 como se ve en la figura 9, siendo 1 mala y 5 excelente, de tal manera se selecciona un mínimo de 3 y máximo 5 ya que se necesita buena maquinabilidad del material para fabricar el engrane y cremallera.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

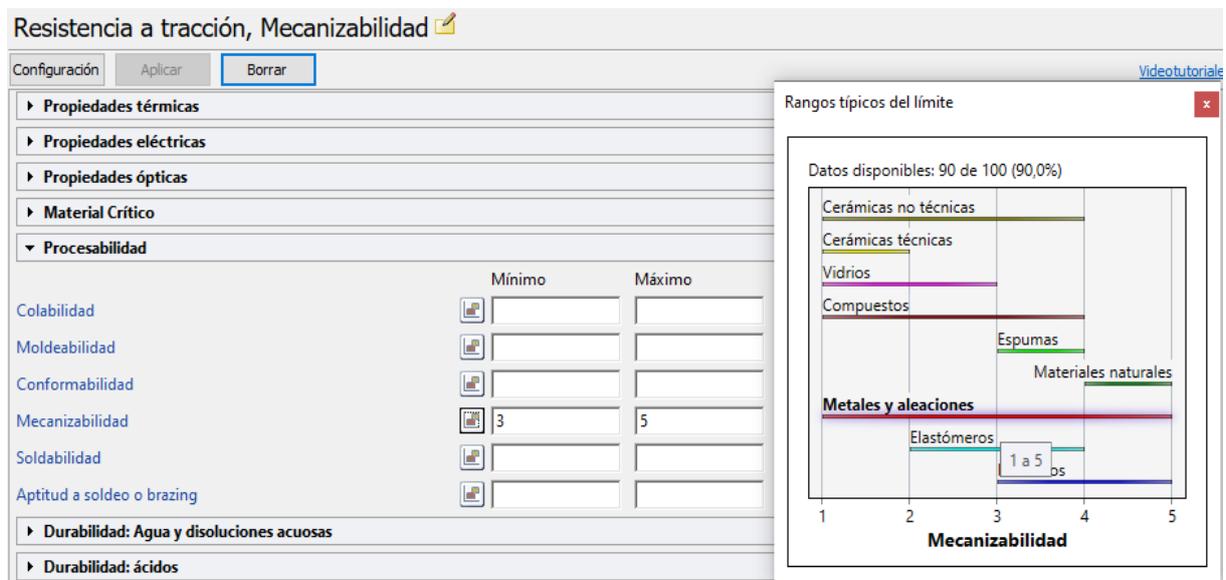


Figura 9. Limitante de procesabilidad para la selección de materiales

Con la finalidad de reducir más la lista de materiales se pone un nuevo límite en las propiedades generales, se establece un techo de 3,5 \$/kg en el precio como se ve en la figura 10, ya que es un criterio que se desea minimizar.

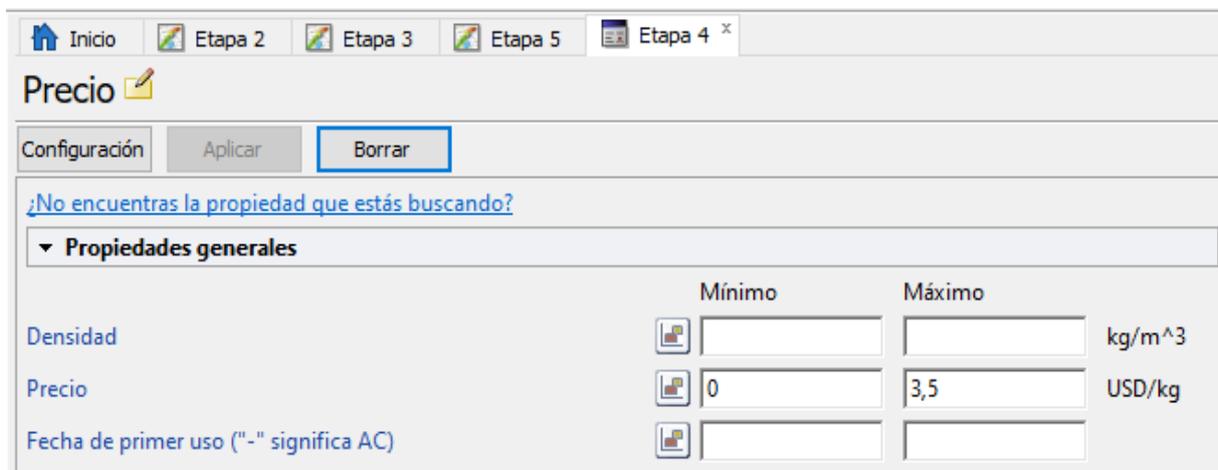


Figura 10. Límite de precio para reducir la lista de materiales

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

De tal manera que se tiene la siguiente lista de materiales que se puede ver en la tabla 2, para aplicar los métodos multicriterio, la metodología LCA y encontrar el más adecuado para la aplicación propuesta.

Tabla de materiales y propiedades

Tabla 2.

Lista de Materiales y Propiedades (criterios) para análisis

Material	Precio (\$/kg)	Densidad (kg/m ³)	Módulo de young (GPa)	Límite elástico (MPa)	Resistencia de tracción (MPa)	% Elongación	Dureza brinell (hbr)	Resistencia a fatiga (MPa)
SAE 4140	0,78	7,85	210	686	882	12	275	314
AISI 303	3,25	7,98	220	241	621	50	160	542
SAE 5115	0,87	7,76	215	598	1070	11	405	224
SAE 1045	0,75	7,85	205	313	637	10	235	286
SAE 1050	0,78	7,85	200	580	748	20	217	310
SAE4340	0,78	7,85	190	686	980	12	330	352
SAE 1018	0,75	7,85	200	305	598	20	163	202

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Aplicación de métodos multicriterios

Primero se utilizarán tres métodos de ponderación para establecer un peso, un valor a las propiedades de los materiales elegidos, estos métodos serán; entropía, desviación estándar y variación estadística a continuación se aplicarán las metodologías: Topsis, Vikor y Copras.

- **Entropía**

Se construye una matriz de decisión (X). Un conjunto de alternativas ($A = \{A_i, i=1, 2, \dots, n\}$) se comparan con respecto al conjunto de alternativas ($C = \{C_j, j=1, 2, \dots, m\}$). Por lo tanto, una matriz de $n \times m$ puede ser obtenida de la siguiente manera:

$$X_{mn} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{2n} \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde:

x_{mn} : pertenece a valores de la matriz de decisión.

Para obtener los pesos relativos por medición de la entropía, la matriz de decisión debe ser normalizada para cada criterio, mediante la siguiente ecuación:

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (2)$$

Donde:

p_{ij} pertenece a valores de la matriz normalizada y m pertenece al número de evaluaciones de los criterios. La matriz estandarizada de pesos se obtiene mediante los valores obtenidos.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{1j} \\ p_{21} & p_{22} & p_{2j} \\ p_{i1} & p_{i2} & p_{ij} \end{bmatrix} \quad (3)$$

. Para calcular la entropía del criterio E_j se utiliza la ecuación 4:

$$E_j = -K * \sum((p_{ij}) * \log(p_{ij})) \quad (4)$$

Donde:

$k=1/\ln(m)$ y $m=$ es el número de opciones.

La entropía calculada va aumentando mientras se asemejan más las a_{ij} consideradas. Como lo que concierne es medir la variedad a partir de E_j ; D_j calculamos según la ecuación 5:

$$D_j = 1 - E_j \quad (5)$$

Al final la variedad de los criterios se regulariza según la ecuación 6:

$$w_j = D_j * \sum D_j \quad (6)$$

Los valores de w_j expresan la ponderación o peso de cada uno de los criterios. (Guajala Agila & Zambrano Solís, 2016)

- **Desviación estándar**

Es similar al método de la entropía, aunque no tan preciso como esta, porque sus resultados pueden verse afectados por una variedad de criterios diferentes, mientras que el proceso de normalización en la entropía evita que esto induzca a error. (Jahan et al., 2012) El método de desviación estándar determina los valores o pesos de los criterios en términos de sus valores de desviación de la siguiente manera:

Corresponde a la medida de dispersión de los valores con respecto a la media.

$$\sigma_j = \sqrt{\sum(x_{ij} - \bar{x}_j)/m} \quad (7)$$

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Donde:

x_{ij} corresponde a los valores de la matriz de decisión

m corresponde al número de criterios evaluados

σ_j corresponde al valor de la desviación estándar.

Los pesos objetivos de cada atributo están dados por la siguiente ecuación:

$$w_j = \sigma_j / \sum (\sigma_j * n_j) = 1 \quad (8)$$

Donde:

w_j : es el peso de cada criterio.

- **Variación Estadística**

Para la normalización se aplica de manera similar al caso de entropía. La matriz normalizada se obtiene de los valores obtenidos de la ecuación 9.

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{1j} \\ p_{21} & p_{22} & p_{2j} \\ p_{i1} & p_{i2} & p_{ij} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Definida como una medida de dispersión de una serie de puntos de información cercanos al valor promedio de estos. Se determinan mediante la siguiente ecuación:

$$V_j = \sqrt{\sum (p_{ij} - \bar{p}_j)^2 * m_i} = 1 \quad (10)$$

Dónde:

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

x_{ij} : corresponde a los valores de la matriz de decisión

m corresponde al número de criterios evaluados

V_j corresponde al valor de la variación estadística.

Luego de comparar estos tres métodos entre sí, se analizará cual es la mejor opción para combinarla con las metodologías de decisión y así establecer un ranking de los materiales que se han elegido como candidatos los mismos serán.

- **Topsis**

Se obtiene a partir de los valores de la matriz de decisión. El valor normalizado r_{ij} se calcula como

$$r_{ij} = a_{ij} / \sqrt{\sum (a_{ij})^2 * m_i} = 1 \quad (11)$$

Donde:

a_{ij} = representa los valores pertenecientes a la matriz de decisión

r_{ij} = representa los valores pertenecientes a la matriz normalizada

Se obtiene la matriz de decisión normalizada ponderada. El valor normalizado ponderado v_{ij} se calcula como la multiplicación de los pesos por el valor normalizado:

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & w_n r_{2n} \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Donde:

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

w_n = representa el valor de peso para cada criterio

V_{ij} = representa la matriz estandarizada de pesos

Se determinan los valores positivos y negativos de las soluciones ideales

$$A^* = \{\max_i v_{ij} \mid j \in J\}, (\min_i v_{ij} \mid j \in J')\} = \{v_{1*}, v_{2*}, \dots, v_{n*}\} \quad (13)$$

$$A^- = \{\max_i v_{ij} \mid j \in J\}, (\min_i v_{ij} \mid j \in J')\} = \{v_{1-}, v_{2-}, \dots, v_{n-}\} \quad (14)$$

Donde:

A^* =Corresponde a los valores positivos ideales

A^- = Corresponde a los valores negativos ideales

Se calculan las medidas de separación, utilizando la distancia n-dimensional euclidiana. La separación de cada alternativa de la solución ideal se da de la siguiente manera

$$S_{i*} = \sqrt{\sum (v_{ij} - v_{j*})^2 n_j} = 1 \quad (15)$$

$$S_{i-} = \sqrt{\sum (v_{ij} - v_{j-})^2 n_j} = 1 \quad (16)$$

Donde:

S_{i*} = Separaciones positivas y S_{i-} = Separaciones negativas

La cercanía relativa de las alternativas se determina mediante la siguiente fórmula:

$$C_{i*} = \frac{S_{i-}}{S_{i-} + S_{i*}} \quad (17)$$

Donde:

C_{i*} = coeficiente de proximidad relativa

La alternativa con el valor C_{i*} más alto se selecciona como la mejor y la alternativa.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

- **Copras**

En el método COPRAS se analizan cada uno de los elementos a evaluar en función del aprovechamiento de los criterios empleados y de las estrategias de ponderación. Donde se elige la mejor alternativa considerando los umbrales entre soluciones (ideales- no ideales). La característica más importante que hace que el método COPRAS sea superior a otros métodos es que puede utilizarse para calcular el grado de utilidad de las alternativas, indicando hasta qué punto una alternativa es mejor o peor que otras alternativas tomadas para la comparación (Chatterjee & Chakraborty, 2012)

Los valores normalizados de esta matriz se calculan utilizando la siguiente fórmula.

$$r_{ij} = a_{ij} * \sum_{m=1}^n a_{ijm}^{-1} \quad (18)$$

Donde:

a_{ij} = representa los valores pertenecientes a la matriz de decisión

r_{ij} = representa los valores pertenecientes a la matriz normalizada

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & r_{2n} \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Se construye la matriz de decisión normalizada ponderada. El valor normalizado ponderado v_{ij} se calcula como la multiplicación de los pesos por el valor normalizado:

Donde:

w_{mn} = representa el valor del peso correspondiente a cada criterio.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

V_{ij} =representa la matriz de pesos estandarizada

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_{1r11} & w_{2r12} & w_{2r1n} \\ w_{1r21} & w_{2r22} & w_{2r2n} \\ w_{1rm1} & w_{2rm2} & w_{2rmn} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Se obtienen las sumas de valores de atributos para los que son preferibles valores mayores, es decir, atributos beneficiosos, para todas las alternativas:

$$S^+_i = \sum_{j=1}^n (y^+_{ij}) \quad (21)$$

Donde:

y^+_{ij} = representan el valor de criterios beneficiosos

S^+_i = representan la sumatoria de valores y^+_i

Se calculan las sumas de valores de atributos para los que son preferibles valores, más pequeños, es decir, atributos no beneficiosos, para todas las alternativas:

$$S^-_i = (\sum y^-_{ij}) \quad (22)$$

Donde:

y^-_{ij} = representan valores pertenecientes a un criterio (costo)

S^-_i = representan la sumatoria de valores de y^-_i

Cuanto mayor sea el valor de S^+_i , mejor es la alternativa y cuanto menor sea el valor de S^-_i , mejor es la alternativa. Los valores S^+_i y S^-_i representan el nivel de prioridad objetiva de cada alternativa. Las prioridades relativas representan el grado de satisfacción alcanzado por una alternativa, se determinan utilizando la siguiente fórmula:

$$Q_i = \frac{S^+_i + \sum_{j=1}^n S^-_{ij}}{S^-_i + \sum_{j=1}^n S^-_{ij}} \quad (23)$$

En donde:

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Q_i = representan los valores para criterios

$$U_i = Q_i * Q_{max} * 100 \quad (24)$$

Dónde: Q_{max} = corresponde a la alternativa con el valor de significación relativa más alto, siendo esta la mejor opción entre las alternativas, U_i = corresponde al nivel de rendimiento.

- **Vikor**

El método VIKOR es una herramienta MCDM eficaz, específicamente aplicable a aquellas situaciones en las que el gestor de la toma de decisiones tiene dificultades en definir criterios de evaluación, o presenta cierto nivel de incertidumbre en el análisis de criterios y su desempeño en el resultado final. El procedimiento computacional del método VIKOR es bastante simple y ofrece un enfoque sistemático y lógico para llegar a la mejor decisión. (Chatterjee & Chakraborty, 2012)

Para la Matriz de Decisión Normalizada y Construcción de matriz estandarizada de pesos. Se utiliza la forma similar que en el método Topsis. Se calculó de indicadores de soluciones positivas y negativos ideales

$$A^* = \{ \max_{i \in J} f_{ij} \mid j \in J \}, \{ \min_{i \in J'} f_{ij} \mid j \in J' \} = \{ f_{1max}, f_{2max}, \dots, f_{nmax} \} \quad (25)$$

$$A^- = \{ \max_{i \in J} f_{ij} \mid j \in J \}, \{ \min_{i \in J'} f_{ij} \mid j \in J' \} = \{ f_{1min}, f_{2min}, \dots, f_{nmin} \} \quad (26)$$

Cálculo de soluciones optimas

$$U_i = \sum W (f_{jmax} - f_{ij}) * (f_{jmax} - f_{jmin}) \quad n_j = 1 \quad (27)$$

$$R_i = \max [W f (f_{jmax} - f_{ij}) * (f_{jmax} - f_{jmin})] \quad (28)$$

Generalmente $\alpha = 0,5$

$$V_i = (U_i - U_{min}) * (U_{max} - U_{min}) + (1 - \alpha) * (R_i - R_{min}) * (R_{max} - R_{min}) \quad (29)$$

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Análisis del ciclo de vida de los aceros candidatos (LCA)

En esta etapa se evalúa el ciclo de vida de los materiales con el fin de determinar los valores de los criterios ambientales y elaborar la matriz que nos permita establecer un peso de estos criterios mediante el método de entropía antes elegido y usar estos pesos para establecer un ranking de materiales que tome en cuenta el ciclo de vida del material usado en el mecanismo piñón cremallera.

Es sabido que las emisiones de CO₂ es el principal contaminante atmosférico, este es producido por la gran mayoría de industrias y la industria del acero y automotriz no se quedan cortas en la cantidad de emisiones anuales de CO₂, lo que contribuye al calentamiento global por lo que este será un criterios ambientales a considerar.

Por otro lado la producción de metal implica un alto consumo de energía, esta energía proviene de distintas fuentes de energía, el producto consume o necesita energía desde su etapa de extracción hasta el momento de ser reciclado con toda la cadena transporte y fabricación que esta conlleve, así este sea otro criterio ambiental a considerar. (Marks et al., 2006)

Como se expresa en (Loganathan y Mani, 2018). Basado en los estándares ISO 14040 y 14044, el método LCA se define como un método de evaluación sistemática y objetiva. Como el administrador ambiental más efectivo, ha sido ampliamente utilizado en varios aspectos. Para lograr desarrollos sostenibles, el diseño sostenible es un tema esencial y los factores ambientales deben considerarse y considerarse criterios de evaluación al comienzo del proceso de diseño del vehículo.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

El segundo paso consiste en crear un inventario de flujos desde y hacia la naturaleza para un sistema de producto. Los flujos de inventario incluyen entradas de energía, materias primas y emisiones al aire, tierra y agua. Para desarrollar el inventario, se construye un modelo de flujo del sistema técnico. El modelo de flujo generalmente se ilustra con un diagrama de flujo que incluye las actividades que se evaluarán en la cadena de suministro relevante y ofrece una imagen clara de los límites del sistema técnico como se ve en la figura 11. Los datos de entrada y salida se utilizan para construir el modelo. (Loganathan y Mani, 2018)

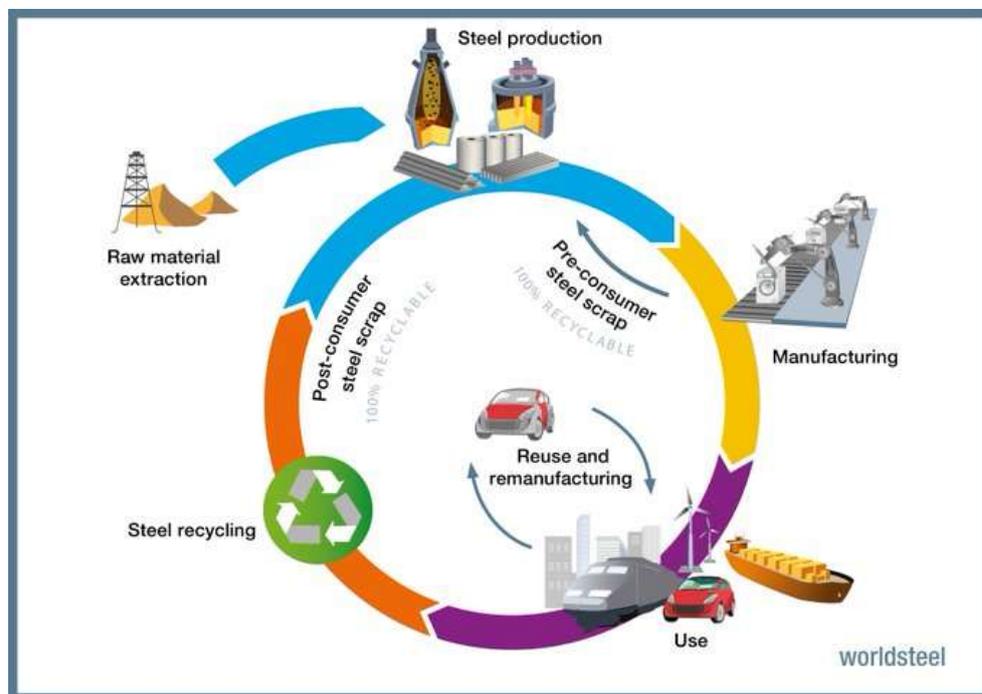


Figura 11. Ciclo de vida del acero (LCA). (*El Acero y La Sustentabilidad: Nuevas Ideas, Mejores Soluciones*, n.d.; *Pasos En El Proceso Moderno de Fabricación de Acero*, n.d.)

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

En el análisis del ciclo de vida se utilizara software CES, este ayudara a determinar los valores de los criterios ambientales que son: Huella de CO₂ y el Consumo energético del piñón – cremallera durante toda su vida útil.

Para obtener estos valores se ingresaran datos en el programa utilizando la herramienta Eco Audit dentro de CES Edupack como se observa en la figura 12, el cual permite ingresar datos como: material, proceso de fabricación, peso, vida útil, entre otros que permitirán calcular los valores de la huella de CO₂ y el consumo energético del producto. A continuación se muestra procedimiento para el análisis de ciclo de vida (LCA) de los materiales seleccionados para el mecanismo piñón cremallera utilizando Eco Audit.

1. Ingresar a CES Edupack y seleccionar el icono de “Eco Audit” de la barra de herramientas.

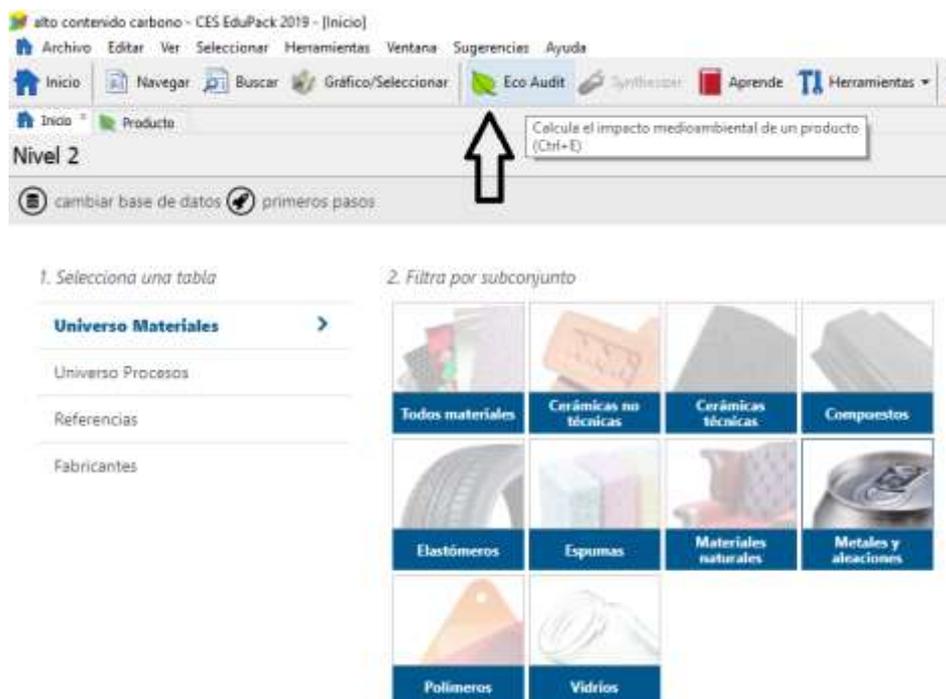


Figura 12. Ingreso a pestaña Eco Audit del software EduPack

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

2. Se despliega una pestaña como se muestra en la figura 13 con el nombre “Producto”, aquí tenemos 2 opciones;

- Definición de producto
- Informe

En la parte de definición de producto tenemos 5 pestañas para ingresar valores:

- Información del producto
- Material, fabricación y fin de vida
- Transporte
- Uso
- Informe

The screenshot shows the 'Proyecto Eco Audit' software interface. At the top, there are two tabs: 'Inicio' and 'Producto'. The 'Producto' tab is active. Below the tabs, the title 'Proyecto Eco Audit' is displayed. The main content area is divided into five sections, each with a blue header and a corresponding arrow pointing to it:

- Definición del producto:** Includes a sub-tab 'Informe'.
- Información del producto:** Contains a 'Nombre' field with the value 'Producto'.
- Material, fabricación y fin de vida:** Features a table with columns: Cantidad, Nombre del componente, Material, Contenido reciclado, Masa (kg), Proceso primario, and Fin de vida.
- Transporte:** Contains a table with columns: Nombre, Tipo de transporte, and Distancia (km).
- Uso:** Includes fields for 'Vida del producto' (1 año), 'País de uso' (Mundo), and two modes: 'Modo estático' (El producto utiliza la siguiente energía) and 'Modo dinámico' (El producto es parte de un vehículo o se transporta en él). It also has fields for 'Entrada y salida de energía' (Eléctrica a térmica), 'Tipo de combustible y movilidad' (Diésel - transporte marítimo), and 'Potencia nominal' (0 W).

At the bottom, there is a final tab labeled 'Informe'.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Figura 13. Herramientas de Eco Audit del software EduPack

Con estos parámetros se podrá obtener un informe detallado con valores de los criterios ambientales CO₂ y consumo energético del producto, valores que servirán para obtener un ranking nuevo de los materiales de este estudio aplicando los MCDM y compararlos con los ranking obtenidos considerando los criterios de diseño tradicionales.

La estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ se realiza en todas las fases del ciclo de vida del producto: extracción de recursos y producción de materiales, montaje, uso, reciclaje, disposición final y transporte. Este último componente se considera entre cada etapa. En la Figura 14 se ilustran los límites del sistema y cada etapa del ciclo de vida. (Mendieta, 2017)

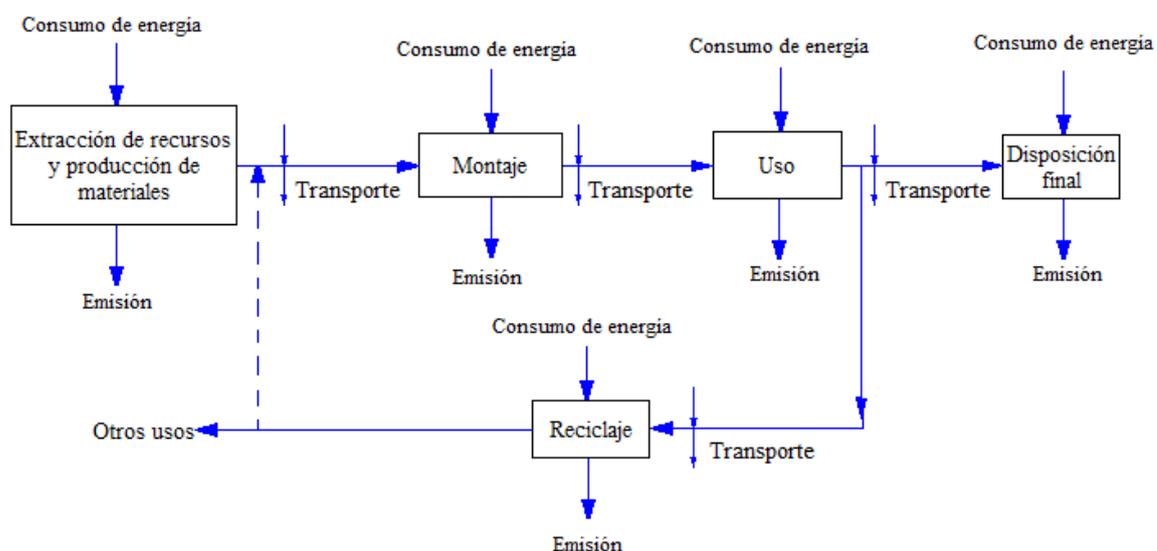


Figura 14. Límites del sistema y etapas del ciclo de vida asociadas a un producto (Mendieta, 2017)

En la tabla 3 se pueden ver los datos para el estudio de ciclo de vida de cada materia preseleccionado, estos datos se ingresan en la herramienta Ecoaudit del CES Edupack.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Tabla 3

Datos para estudio de ciclo de vida

Componentes	%reciclado	Proceso primario	Fin de vida	Masa
Cremallera	% típico	extruido	reciclado	0,995 Kg
Piñón	% típico	extruido	reciclado	0,184 Kg
Transporte	Nombre		Tipo	Distancia
1	Mina hacia fábrica de acero		buque carga	2000
2	Fabrica acero a fábrica de autos		camión 55 ton	500
3	Fabrica autos a Latinoamérica		buque carga	3000
4	Transporte a reciclaje		camión 55 ton	700
Modo de Uso	Dinámico (parte de un auto)			
Vida útil	15 años			
País de uso	Latinoamérica			
Combustible	gasolina			
Movilidad	auto familiar			
Días de uso	220 días al año			
Km recorridos	60 Km/ día			

Se utilizaran los datos de la tabla 3 y se aplicara este proceso para cada uno de los materiales de estudio, como se muestra a continuación.

En la figura 15 se observa la interfaz de Eco Audit que permite el ingreso de las variables o parámetros para obtener el análisis del ciclo de vida del producto. En la pestaña de material se puede enumerar las piezas del estudio , tipo de material, % de reciclado, la masa del componente, el procesos primario de fabricación y su fin de vida si es o no reciclado el componente después de su vida útil.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

AISI 4140

Definición del producto Informe

Información del producto

Nombre: PIÑON CREMALLERA CON ACERO SAE 4140

Material, fabricación y fin de vida

Cantidad	Nombre del componente	Material	Contenido reciclado	Masa (kg)	Proceso primario	Fin de vida
1	piñon	Acero c...	% típico	0,184	Extrusión, laminado de hoja	Reciclar
1	cremallera	Acero c...	% típico	0,995	Extrusión, laminado de hoja	Reciclar

Transporte

Nombre	Tipo de transporte	Distancia (km)
aceria hacia fabrica engran	Transporte marítimo	2000
fabrica engranes a fabrica :	Camión de 55 toneladas (€	500
fabrica de autos a latinoam	Transporte marítimo	3000
transporte a fabrica de resi	Camión de 55 toneladas (€	700

Uso

Vida del producto: 15 años

País de uso: Latinoamérica

Modo estático

El producto utiliza la siguiente energía:

Entrada y salida de energía: Combustible fósil a mecánica, combi

Potencia nominal: 0 hp

Uso: 0 días al año

Modo dinámico

El producto es parte de un vehículo o se transporta en él:

Tipo de combustible y movilidad: Gasolina - coche familiar

Uso: 220 días al año

Distancia: 60 km al día

Figura 15. Parámetros del acero SAE 4140 ingresados en Eco Audit

En la figura 16 en la pestaña de transporte se permite enumerar las diferentes etapas que involucran movilización durante el ciclo de vida desde su cuna hasta su reciclaje para volver ser fundido en metal del piñon cremallera, ingresar el tipo de transporte marítimo, terrestre y aéreo con sus respectivas distancias y así establecer cuanto aporta el transporte en la huella de carbono y el consumo energético de cada uno de los material de estudio.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

SAE/AISI 303

Definición del producto Informe

Información del producto

Nombre: PIÑON CREMALLERA SAE/AISI 303

Material, fabricación y fin de vida

Cantidad	Nombre del componente	Material	Contenido reciclado	Masa (kg)	Proceso primario	Fin de vida
1	PIÑON	Acero inoxidable	% típico	0,184	Extrusión, laminado de hoja	Reciclar
1	CREMALLERA	Acero inoxidable	% típico	0,995	Extrusión, laminado de hoja	Reciclar

Crítico: > 5% del peso de los elementos utilizados en este material se encuentran en las listas de elementos críticos de la UE

Transporte

Nombre	Tipo de transporte	Distancia (km)
mina hacia fabrica de acer	Buque de carga	3000
fabrica acero a fabrica aut.	Camión de 55 toneladas (l)	500
fabrica de autos a latinoar	Buque de carga	3000
transporte adicional	Camión de 55 toneladas (l)	700

Uso

Vida del producto: 15 años

País de uso: Latinoamérica

Modo estático El producto utiliza la siguiente energía:

Modo dinámico El producto es parte de un vehículo o se transporta en él:

Entrada y salida de energía: Eléctrica a térmica

Tipo de combustible y movilidad: Gasolina - coche familiar

Potencia nominal: 0 W

Uso: 220 días al año

Uso: 0 días al año

Distancia: 60 km al día

Figura 16. Parámetros acero SAE 303 Eco Audit

En la figura 17 en la pestaña de uso podemos ingresar la vida útil de, o de los componentes del producto en años, el país o región del planeta donde se va a utilizar el producto y si se va a utilizar de manera estática o dinámica.

Una vez completada toda esta información se puede ingresar a la pestaña “informe” y obtener los datos que estamos buscando para establecer el ranking de materiales con los métodos de selección multicriterios a más de otros datos y gráficos comparativos entre materiales que serán un buen aporte al presente estudio.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

SAE 5115

Definición del producto Informe

Información del producto

Nombre:

Material, fabricación y fin de vida

Cantidad	Nombre del componente	Material	Contenido reciclado	Masa (kg)	Proceso primario	Fin de vida
1	PIÑÓN	Acero con bajo contenid...	% típico	0,184	Extrusión, laminado de hoja	Reciclar
1	CREMALLERA	Acero con bajo contenid...	% típico	0,995	Extrusión, laminado de hoja	Reciclar
				0		Ninguno

Transporte

Nombre	Tipo de transporte	Distancia (km)
aceria hacia fabrica engran	Transporte marítimo	2000
fabrica engranes a fabrica :	Camión de 55 toneladas (€	500
fabrica de autos a latinoar	Transporte marítimo	3000
transporte a fabrica de res	Camión de 55 toneladas (€	700

Uso

Vida del producto: años

País de uso:

Modo estático
 El producto utiliza la siguiente energía:

Entrada y salida de energía:

Potencia nominal: W

Uso: días al año

Modo dinámico
 El producto es parte de un vehículo o se transporta en él:

Tipo de combustible y movilidad:

Uso: días al año

Distancia: km al día

Figura 17. Parámetros acero SAE 5115 Eco Audit

En la figura 18 en la pestaña de “uso” se tiene dos opciones de funcionamiento del componente puede ser estático o dinámico, ya que el mecanismo piñón – cremallera es parte de la dirección del automóvil se selecciona el modo dinámico donde se ingresan valores de tipo de combustible y tipo de transporte, días al año que se usara y distancia recorrida por día, con estos parámetros se podrá estimar los valores de la huella de CO₂ y del consumo energético durante el uso del mecanismo en el vehículo.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

SAE 1045

Definición del producto Informe

Información del producto

Nombre:

Material, fabricación y fin de vida

Cantidad	Nombre del componente	Material	Contenido reciclado	Masa (kg)	Proceso primario	Fin de vida
1	PIÑÓN	Acero con contenido...	% típico	0,184	Extrusión, laminad...	Reciclar
1	CREMALLERA	Acero con contenido...	% típico	0,995	Extrusión, laminad...	Reciclar

Transporte

Nombre	Tipo de transporte	Distancia (km)
mina hacia fabrica acero	Buque de carga	2000
fabrica acero hacia fabrica a	Camión de 55 toneladas (8	500
fabrica de autos a latinoamer	Transporte marítimo	3000
transporte a reciclar	Camión de 55 toneladas (8	500

Uso

Vida del producto: años

País de uso:

Modo estático

El producto utiliza la siguiente energía:

Entrada y salida de energía:

Potencia nominal: W

Uso: días al año

Modo dinámico

El producto es parte de un vehículo o se transporta en él:

Tipo de combustible y movilidad:

Uso: días al año

Distancia: km al día

Figura 18. Parámetros acero SAE 1045 Eco Audit

En la pestaña de “Material” como se ve en la figura 19 se incluyen los dos componentes del estudio estos son: el piñón y la cremallera, a cada material se le asigna un material específico de la base de datos del software, a continuación se tiene la opción de elegir si el material contiene un porcentaje de reciclaje o si proviene completamente de la mina (material virgen).

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

SAE 1050

Definición del producto Informe

Información del producto ?

Nombre: PIÑON CREMALLERA CON ACERO SAE 1050

Material, fabricación y fin de vida ?

Cantidad	Nombre del componente	Material	Contenido reciclado	Masa (kg)	Proceso primario	Fin de vida
1	PIÑON	Acero con alto co...	% típico	0,184	Extrusión, laminado de hoja	Reciclar
1	CREMALLERA	Acero con alto co...	% típico	0,995	Extrusión, laminado de hoja	Reciclar

Transporte ?

Nombre	Tipo de transporte	Distancia (km)
mina hacia fabrica de acer	Buque de carga	2000
fabrica acero a fabrica autc	Camión de 55 toneladas (€	500
fabrica de autos a latinoam	Buque de carga	3000
transporte a reciclaje	Camión de 55 toneladas (€	700

Uso ?

Vida del producto: 15 años

País de uso: Latinoamérica

Modo estático

El producto utiliza la siguiente energía:

Entrada y salida de energía: Eléctrica a térmica

Potencia nominal: 0 W

Uso: 0 días al año

Modo dinámico

El producto es parte de un vehículo o se transporta en él:

Tipo de combustible y movilidad: Gasolina - coche familiar

Uso: 220 días al año

Distancia: 60 km al día

Figura 19. Parámetros acero SAE 1050 Eco Audit

A cada elemento se le adjudica un peso en kilogramos, este es el peso del componente analizar el ciclo de vida, se le asigna un proceso de fabricación dependiendo de cómo sea producido en el caso de estudio los engranes se fabrican a partir de ejes extruidos, por último se puede elegir si el componente al fin de su vida es reciclado o no, estos parámetros sirven para determinar la cantidad de energía y CO₂ emitido en la fase de producción del material como se ve en la figura 20.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

SAE 1018

Proyecto Eco Audit

Definición del producto

Nombre:

Material, fabricación y fin de vida

Cantidad	Nombre del componente	Material	Contenido reciclado	Masa (kg)	Proceso primario	Fin de vida
1	PIÑON	Acero de b...	% típico	0,184	Extrusión, laminado de hoja	Infrareciclaje
1	CREMALLERA	Acero de b...	% típico	0,995	Extrusión, laminado de hoja	Infrareciclaje
1				0		Ninguno

Transporte

Nombre	Tipo de transporte	Distancia (km)
aceria hacia fabrica engran	Transporte marítimo	2000
fabrica engranes a fabrica	Camión de 55 toneladas (8	500
fabrica de autos a latinoam	Buque de carga	3000
transporte a fabrica de resi	Camión de 55 toneladas (8	700

Uso

Vida del producto: años

País de uso:

Modo estático

El producto utiliza la siguiente energía:

Entrada y salida de energía:

Potencia nominal: W

Uso: días al año

Uso: horas al día

Modo dinámico

El producto es parte de un vehículo o se transporta en él:

Tipo de combustible y movilidad:

Uso: días al año

Distancia: km al día

Figura 20. Parámetros acero SAE 1018 Eco Audit

Como se ve en la figura 21 otro de los parámetros a tomar en cuenta para el análisis del ciclo de vida es el transporte, en el cual se incluirán 4 ítems:

- Mina hacia fábrica de acero
- Fábrica de acero hacia fábrica de autos
- Fábrica de autos a puerto de Latinoamérica

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

- Transporte a fábrica de reciclaje.

SAE 4340

⤴ Información del producto ?

Nombre:

⤴ Material, fabricación y fin de vida ?

Cantidad	Nombre del componente	Material	Contenido reciclado	Masa (kg)	Proceso primario	Fin de vida
1	PIÑON	Acero con bajo contenid...	% típico	4,5	Extrusión, laminado de hoja	Reciclar
1	CREMALLERA	Acero con bajo contenid...	% típico	2,5	Extrusión, laminado de hoja	Reciclar

⤴ Transporte ?

Nombre	Tipo de transporte	Distancia (km)
aceria hacia fabrica engran	Buque de carga	2000
fabrica engranes a fabrica :	Camión de 55 toneladas (€	500
fabrica de autos a latinoam	Buque de carga	3000
puerto latinoamericano a :	Camión de 55 toneladas (€	700

⤴ Uso ?

Vida del producto: años

País de uso:

Modo estático

El producto utiliza la siguiente energía:

Entrada y salida de energía:

Potencia nominal: W

Uso: días al año

Uso: horas al día

Modo dinámico

El producto es parte de un vehículo o se transporta en él:

Tipo de combustible y movilidad:

Uso: días al año

Distancia: km al día

Figura 21. Parámetros acero SAE 4340 Eco Audit

Nota: A cada ítem se le asignara un tipo de transporte y la respectiva distancia, este tipo de transporte y la distancia será la misma para todos los materiales. Al igual que en la pestaña de “Uso” se establecerá para todos los materiales de estudio los mismos parámetros, para la vida del producto asignamos 15 años que es el tiempo de vida útil promedio de un auto, ver anexo C, país de uso será Latinoamérica, y ya que el elemento de estudio es parte de un auto se asigna el modo dinámico de uso, seleccionando el tipo de combustible Gasolina-Auto familiar, con uso de 220 días al año y 60 km/día de recorrido, ver la tabla 3.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Así los materiales serán analizados de forma equitativa y se debe hacer de esta manera ya que se está analizando distintos materiales pero para una misma aplicación por lo que el transporte debe ser el mismo, se considera que todos los materiales hacen el mismo recorrido y el uso que se le da también.

Correlación de Spearman

La correlación de Spearman es un índice estadístico que mide la relación lineal entre dos variables cuantitativas. Si no existen valores de datos repetidos, se obtiene una correlación perfecta de Spearman de +1 o -1 si es que cada una de las variables es una función monótona perfecta. La correlación de rango de Spearman está entre los valores de 0 a 1 si es correlación positiva, y entre -1 y 0 si la correlación es negativa y se calcula de acuerdo con la ecuación 29 que se muestra a continuación. (Toledo y Martínez, 2019)

$$a = 1 - \frac{6\sum(Di^2)}{n(n^2-1)} \quad (30)$$

Donde R_s es el coeficiente de Spearman, D_i es la diferencia entre los rangos de cada caso, y n es el número de pares de valores.

Datos para el mecanismo piñón cremallera

Para analizar el comportamiento del material seleccionado en el mecanismo piñón cremallera se hace necesario calcular ciertos parámetros del sistema de engranajes, así como conocer las fuerzas que actúan en el mecanismo durante su funcionamiento, para lo cual se emplean las formulas de la tabla 4, dichas formulas permitirán obtener datos de la geometría del mecanismo y los valores de los esfuerzos generados en el mismo al momento de realizar

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

un giro, estos datos deberán ser comparados con los datos obtenidos mediante la simulación en Ansys. Los valores obtenidos aplicando las formulas se pueden observar en la tabla 5.

Tabla 4.
Nomenclatura y fórmulas para caculos del piñón cremallera

ítem	símbolo	formula	ecuación
modulo	m		
ángulo presión	α		
# dientes	Zp_min	$Zp_min=(2*ha)/m*\text{sen}^2\alpha$	(31)
altura de la cremallera	H		
paso primitivo	P	$P=m*\pi$	(32)
diámetro primitivo	dp	$dp=m*Z$	(33)
diámetro exterior	da	$da=dp+2m$	(34)
diámetro de fondo	df	$df=dp-2.5m$	(35)
diámetro base	db	$db=dp*\cos \alpha$	(36)
altura del diente	h	$h=2,25*m$	(37)
altura de cabeza del diente	ha	$ha=m$	(38)
altura del pie del diente	hf	$hf=1.25*m$	(39)
claro	c	$0,25*m$	(40)
espesor diente	e	$1,5708*m$	(41)
ancho diente	B	$(10-15)*m$	(42)
avance	A	$A=\pi*dp$	(43)
velocidad de la cremallera	Va	$Va=dp/2$	(44)
revoluciones cremallera	Np	$Np=(Va*60)/A$	(45)

Para el cálculo de los esfuerzos ejercidos sobre el mecanismo, el factor de seguridad y comparar los resultados con los resultados de la simulación es necesario saber el torque aplicado al piñón cuando se realiza un giro en el volante, según estudios anteriores sobre diseño y simulación de mecanismos piñón-cremallera para lo cual se utiliza la siguiente formula:

$$Tk = W * u \sqrt{\frac{B^2}{8} + E^2} \quad (46)$$

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

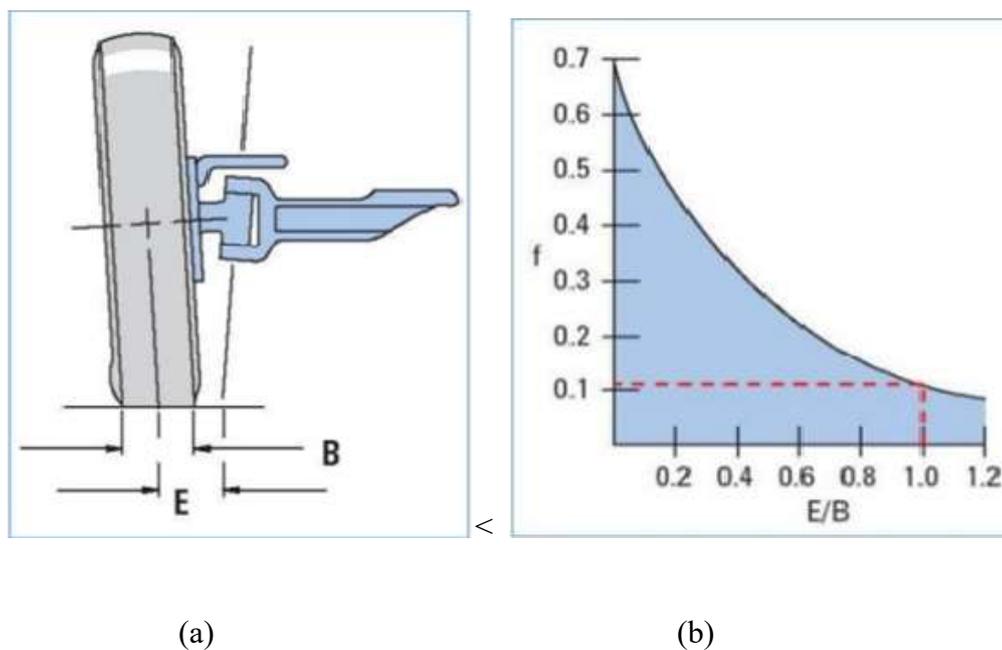


Figura 23. Grafica de relación entre fricción y ancho de llanta (*Power Steering Calc | Cylinder (Engine) | Volume*, n.d.) (*Zero Turn Radius Report - Team Panache (1)*, n.d.)

El Torque en el piñón queda definido por la siguiente formula.

$$\text{Torque en piñon} = \frac{Tk * (\text{radio de giro})}{\text{diametro del piñon}} \quad (47)$$

Wilfred Lewis introdujo una ecuación para estimar el esfuerzo de flexión en dientes de engranes en la que interviene la forma de los mismos. La ecuación, que fue dada a conocer en 1892, aún sigue siendo la base de la mayoría de los diseños de engranes.

El empleo de esta ecuación para Y significa que sólo se considera la flexión del diente y que se ignora la compresión debida a la componente radial de la fuerza. Los valores de Y que se obtienen mediante dicha ecuación se tabulan en la tabla siguiente.

La versión métrica de esta ecuación corresponde a

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

$$\sigma = \frac{KvWt}{F*m*Y} \quad (48)$$

Donde el ancho de la cara F y el módulo m están en milímetros (mm). Si se expresa la componente tangencial de la carga Wt en newtons (N) se producen unidades de esfuerzo en mega pascuales (MPa). Como regla general, los engranes rectos deben tener el ancho de la cara F de tres a cinco veces el paso circular p . (BUDYNAS, RICHARD G. NISBETT, 2014)

Por ultimo para terminar la comprobación de resultados se calcula el factor de seguridad despejando de la ecuación de flexión a fatiga.

$$\text{Esfuerzo a fatiga permisible} = \frac{St}{Sf Kt*Kr} \frac{YN}{Kt*Kr} \quad (49)$$

Donde:

St = esfuerzo de flexión permisible (lbf/pulg²).

Sf = factor de seguridad

YN = es el factor de ciclos de esfuerzo del esfuerzo de flexión.

Kt = son los factores de temperatura.

Kr = son los factores de confiabilidad.

Sf = es el factor de seguridad AGMA, una relación de esfuerzo.(BUDYNAS, RICHARD G. NISBETT, 2014)

Modelado CAD

Primero se debe obtener el modelo CAD de los elementos, en este caso el piñón y la cremallera, para lo que se utiliza un software de diseño Inventor 2020 en su versión

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

estudiantil, se dibuja los engranes utilizando la herramienta generador de engranes en el modo de ensamble.

Después de aplicar las ecuaciones de engranes de la tabla 4 obtenemos los valores de la tabla 35, valores que describen la geometría del piñón- cremallera y se utilizaran para dibujar los elementos en software Inventor y en los cálculos del esfuerzo en los dientes.

Se desarrolla cada elemento en una hoja o archivo diferente, se guardan en una misma carpeta y en un archivo nuevo se realiza el ensamble del mecanismo piñón cremallera como se observa en las figuras 24, 25, 26. Los planos de los elementos se muestran en el anexo A y en la tabla 5 se puede ver los datos para el modelado y la simulación.

Tabla 5
Datos para simulación

Material		Piñon		Cremallera
acero	SAE 4340	Módulo		2
Sut=	980 MPa	Angulo presión		20°
S=	560 MPa	# dientes	20	30
E=	190 GPa	Dprim=	40mm	
Poisson=	0,33	B=	21 mm	



Figura 24. Piñón dibujado en Inventor

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).



Figura 25. Cremallera en Inventor



Figura 26. Ensamble piñón – cremallera

Una vez realizado el modelo CAD y el ensamble se guarda dicho ensamble en formato STEP (.stp), para poder ser abierto posteriormente en el programa de simulación Ansys.

Simulación por elementos finitos mediante ANSYS

Para comenzar la simulación se debe seleccionar primero el tipo de análisis que se va a realizar, para el presente estudio se selecciona de la barra de herramientas la opción “estático estructural” como se muestra en la figura 27 y se despliegan dos ventanas (A y B) con opciones necesarias para empezar a analizar el comportamiento del Acero 4340 elegido

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

previamente por MCDM para el mecanismo de piñón – cremallera con los datos y las condiciones.

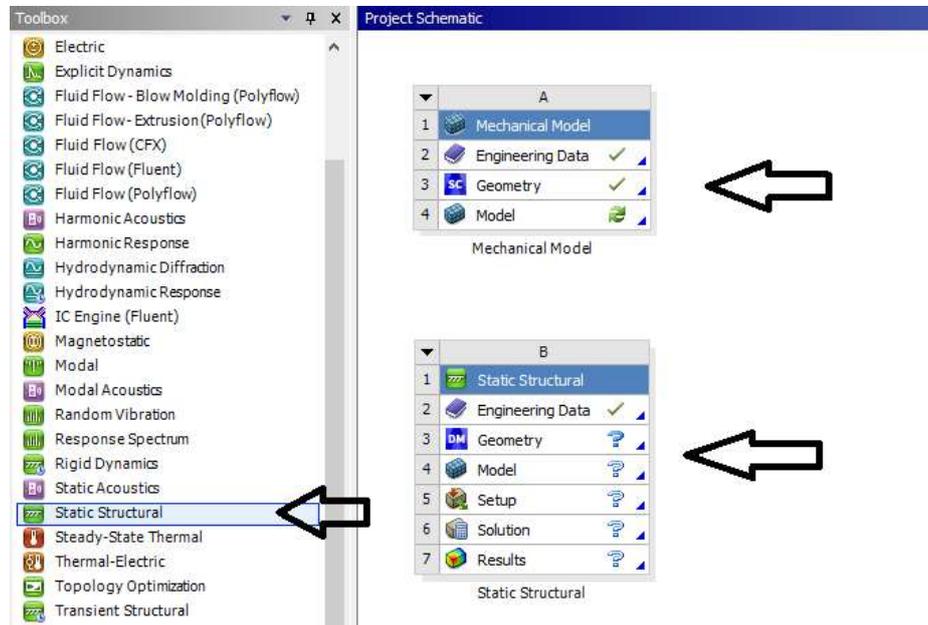


Figura 27. Selección de tipo de estudio de la barra de herramientas

A continuación en las pestaña que se ve en la figura 27, se ingresa el material en la opción “Engineering Data” para este caso el Acero 4340 es un acero de bajo carbono con tratamiento térmico, en la tabla 2 se tiene su propiedades mecánicas, se puede crear un nuevo material, utilizar una base de datos de Ansys o también se puede elegir de la base de datos de Granta Design.

Se selecciona de la base de datos de Granta Design un acero de bajo carbono y se ingresan los datos del acero 4340 de la tabla 3, y agregar el material al estudio, si se agregó correctamente aparecerá un visto de color verde a lado de “Engineering Data” como se observa a continuación en la figura 28.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Common Material Properties	
Density	7,85e-09 kg/mm ³
Young's Modulus	1,9e+05 MPa
Thermal Conductivity	
Specific Heat	
Tensile Yield Strength	686,00 MPa
Tensile Ultimate Strength	980,00 MPa
Nonlinear Behavior	False
Full Details	Click To View Full Details

Statistics	
Assigned Bodies	2

SAE 4340	
Density	7,85e-09 kg/mm ³

Structural	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	1,9e+05 MPa
Poisson's Ratio	0,33000
Bulk Modulus	1,8627e+05 MPa
Shear Modulus	71429 MPa
Tensile Ultimate Strength	980,00 MPa
Tensile Yield Strength	686,00 MPa

Figura 28. Selección de material e ingreso de datos del acero AISI 4340

El siguiente paso es importar el conjunto CAD que se desarrolló en el software Inventor, para eso hace doble clic en la pestaña “Geometry” como se ve en la figura 29 y se recurre al archivo guardado en formato “.spt”, abrimos este archivo y el conjunto piñón – cremallera se importa al programa en una ventana nueva en esta ventana de modelado se tiene la opción de editar la geometría del mecanismo previo a realizar el estudio se elimina las partes redondeadas de la cremallera porque el análisis se realizara en la parte de los diente como se puede apreciar en la figura 30.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

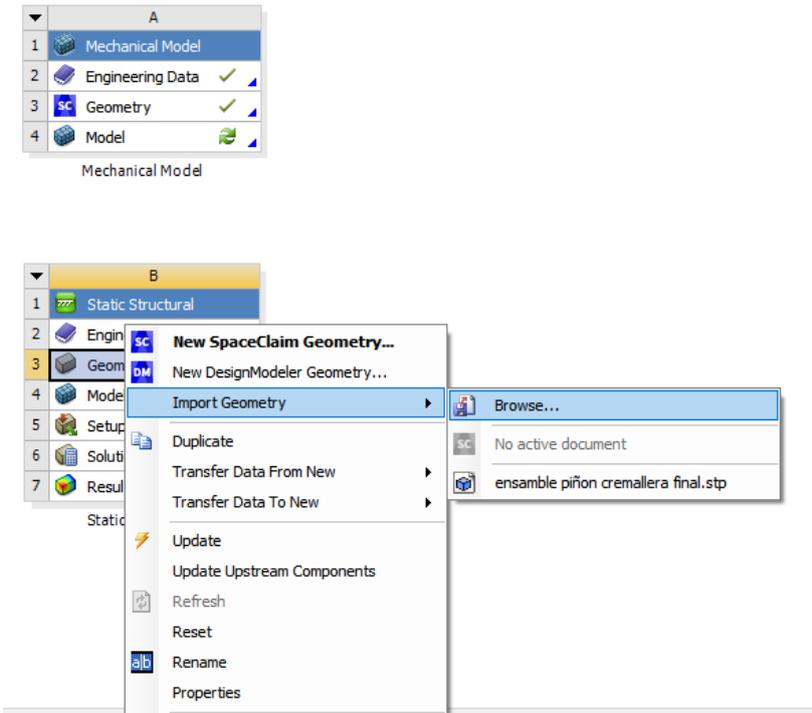


Figura 29. Pasos para importar geometría

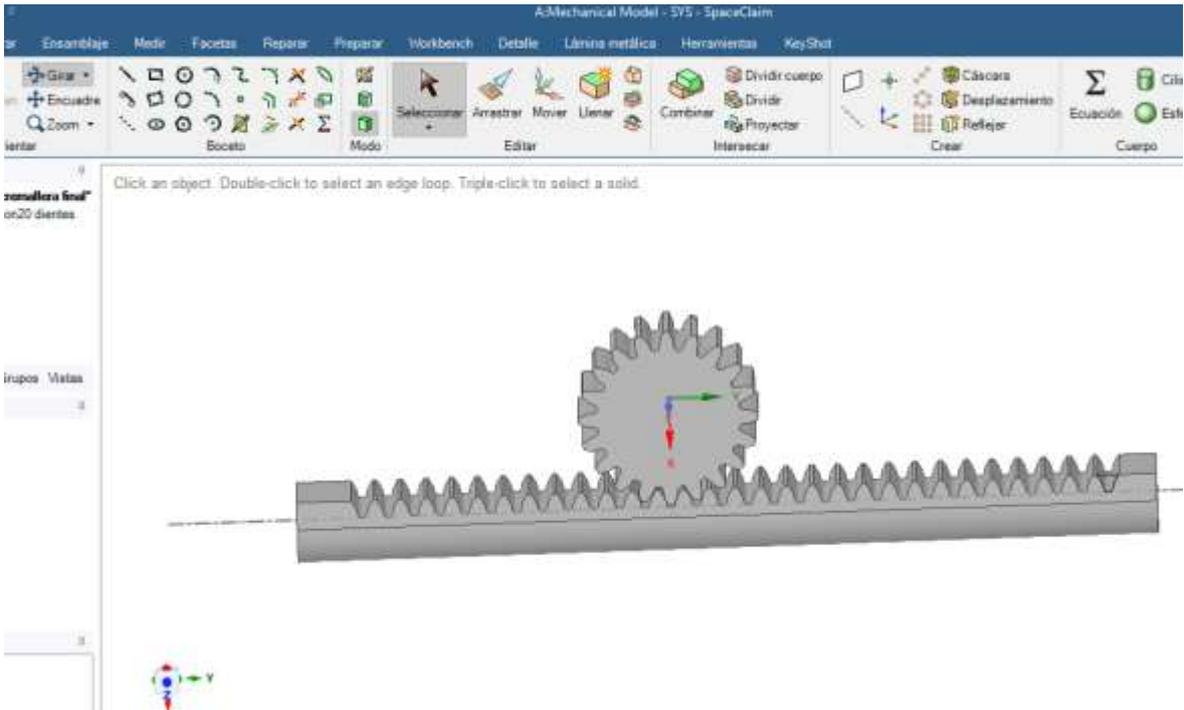


Figura 30. Mecanismo piñón cremallera editado a Ansys

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Se edita la geometría eliminando las superficies redondeadas que no intervienen para el estudio de mecanismo como se ve en la figura 30. Y en la pestaña “Model” que se ve en la figura 29 se hace doble clic y en una nueva pestaña de “Static Structural” se abre el ensamble listo para realizar el análisis como se ve en la figura 31 a continuación.

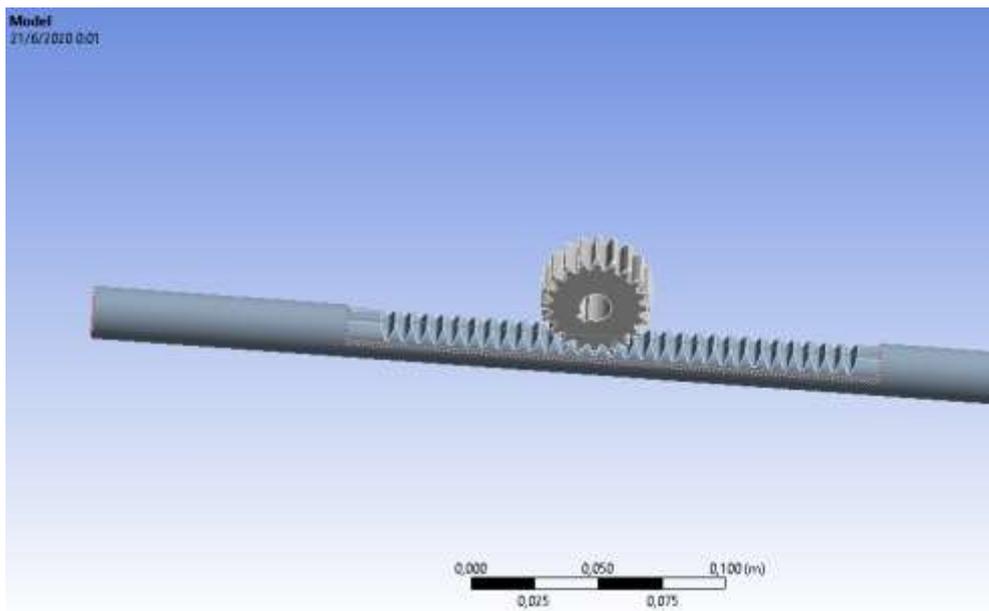


Figura 31. Mecanismo piñón cremallera en entorno de estudio

Una vez establecida la geometría y el material de del conjunto lo siguiente es que en la pestaña “Connections” establecer las regiones de contacto entre los engranes como se puede ver en la figura 32, el área de contacto del piñón en rojo y el área de la cremallera en azul, serán las áreas analizar en la simulación.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

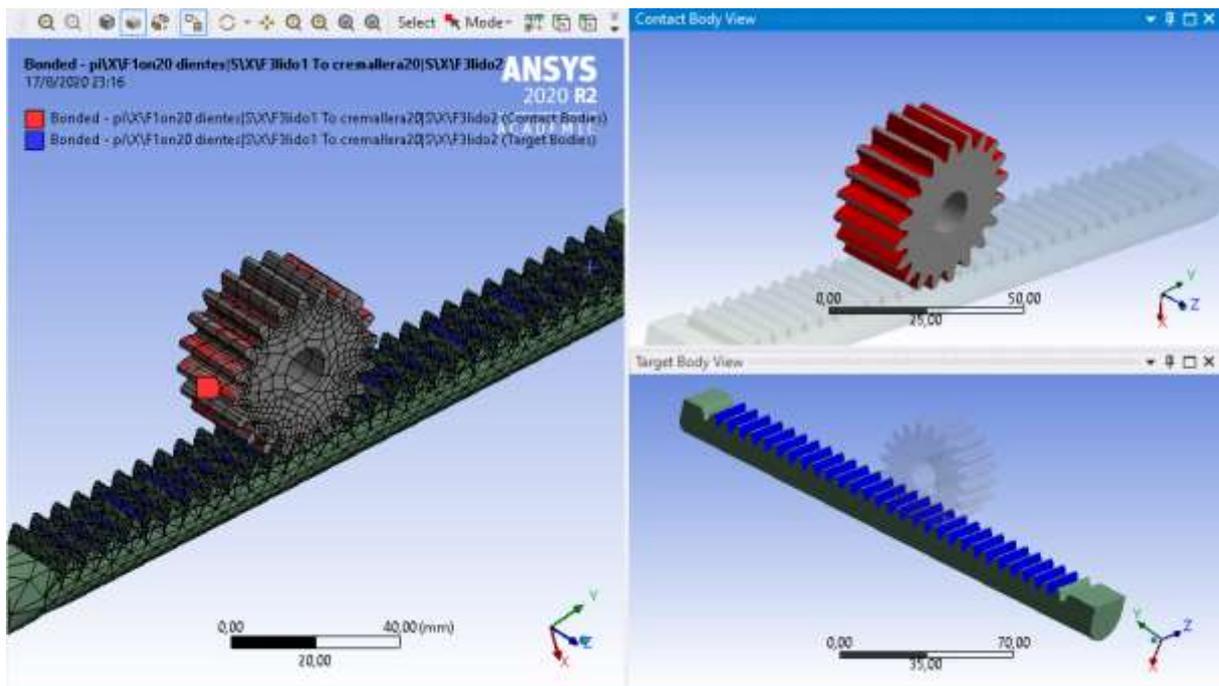


Figura 32. Áreas de contacto en entorno de estudio

Después de establecer los contactos se procede al mallado como se ve en la figura 33, estableciendo los detalles de la malla como se observa en la figura 34 a continuación.

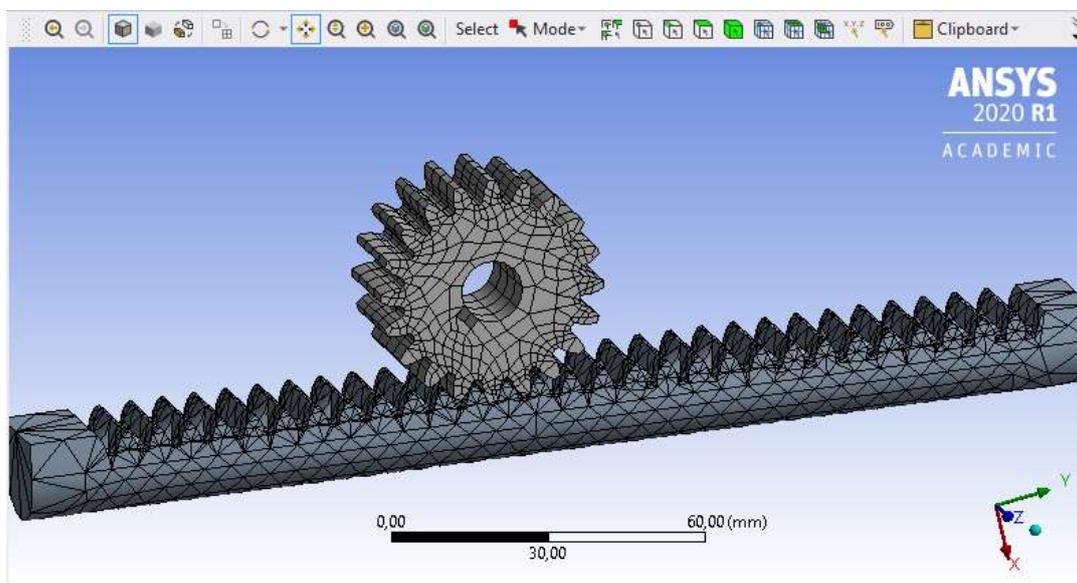


Figura 33. Mallado del piñón cremallera

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

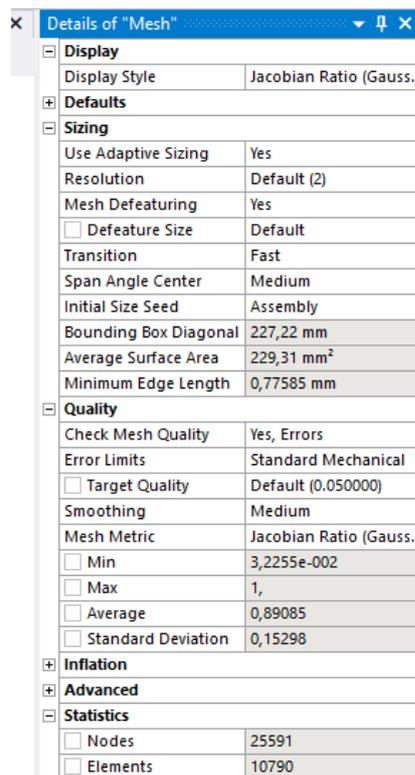


Figura 34. Detalles de Mallado

En la figura 35 se puede observar el control del mallado el valor es 0,952 muy cercano a 1 lo que comprueba correlación de la simulación.

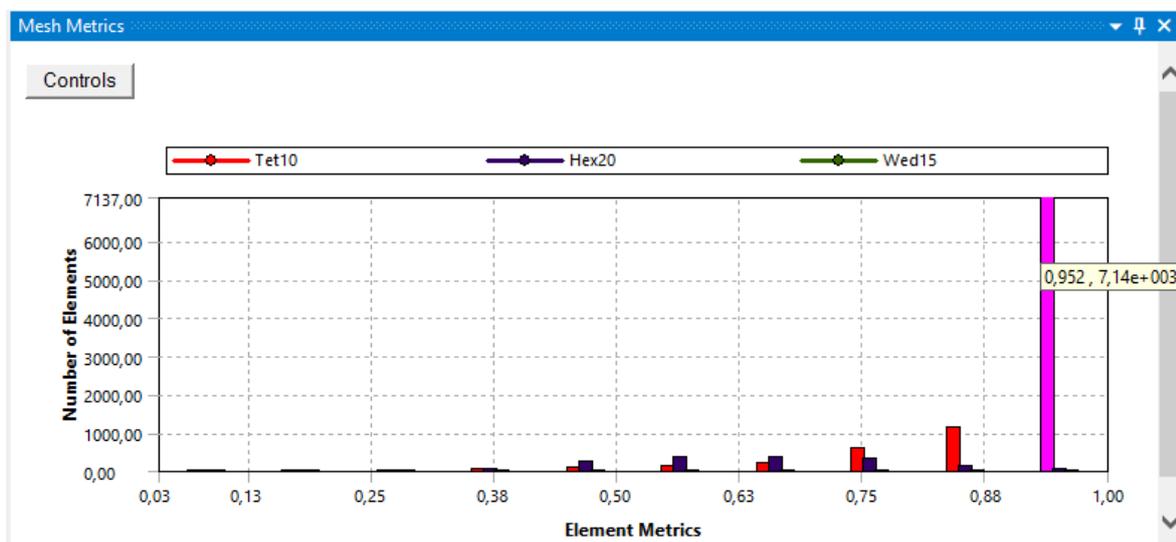


Figura 35. Control de mallado

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Aplicación del momento

Posterior a realizar el mallado se procede a asignar la fuerza que actuara sobre la cremallera que se calculó antes de 260 N. En el mecanismo piñón cremallera, el piñón trasmite la fuerza a la cremallera por lo que el momento se coloca en el eje del piñón como se observa en la siguiente figura 36.

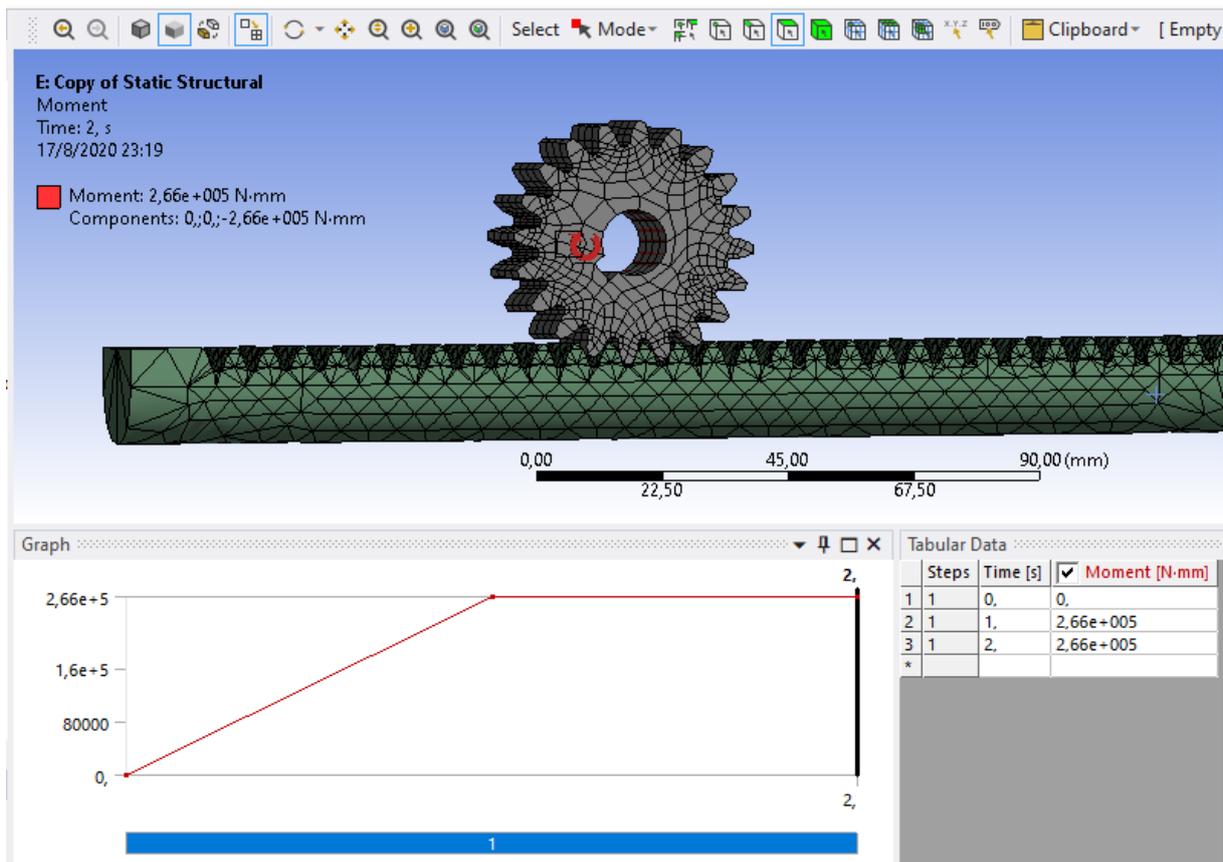


Figura 36. Detalles de aplicación de momento

En la figura 37 se observa las condiciones de contorno para el estudio del mecanismo piñón cremallera con el material SAE 4340 y 1045, la condición de contorno se aplicó a las regiones de contactos entre dientes del piñón cremallera según el método de la teoría de Von Mises para la determinación del esfuerzo de flexión, debido a que no se aplica fuerzas sino la

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

carga por el contacto que existe entre diente y diente para transferir la carga, en el área de contacto ahí se genera esfuerzo por efecto del trabajo de los engranes. (Salazar y Martinez.,2019)
Se obtendrán valores de deformación total, esfuerzo equivalente y el factor de seguridad como se puede ver en la figura 37.

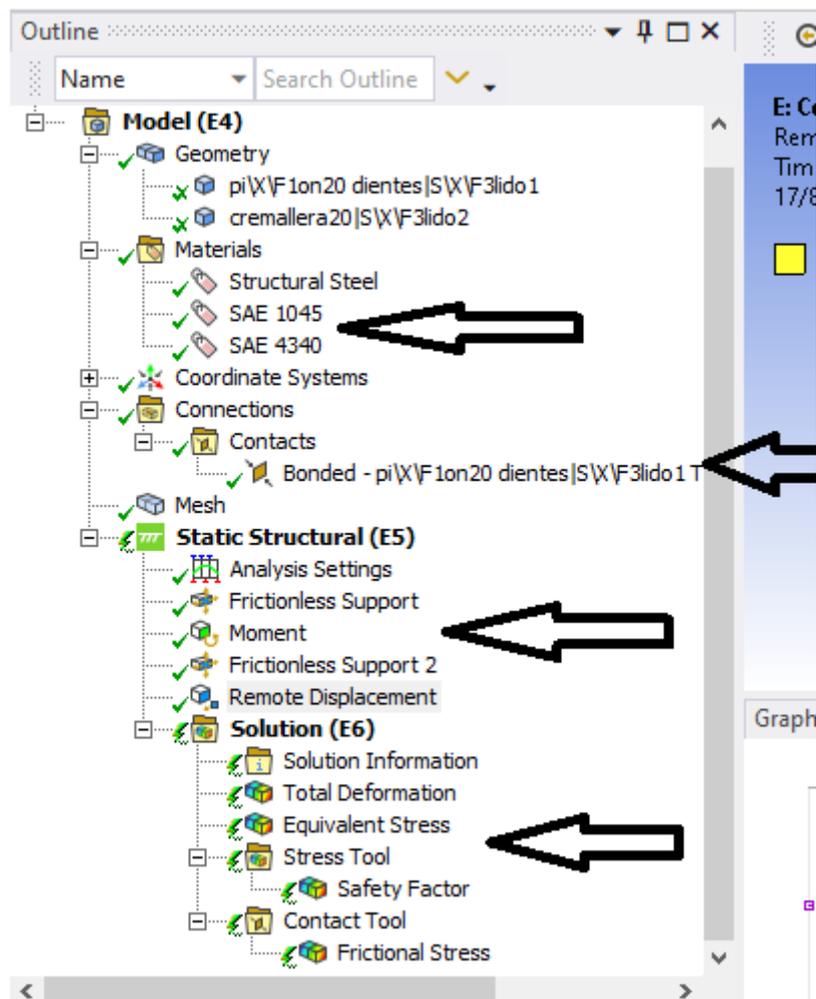


Figura 37. Condiciones de contorno

Resultados

Selección por índices del CES Edupack

Después de establecer los límites de la elección que se observan en la figura 8 y 9 el número de materiales se reduce a 14 materiales como se puede ver en la figura 38.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

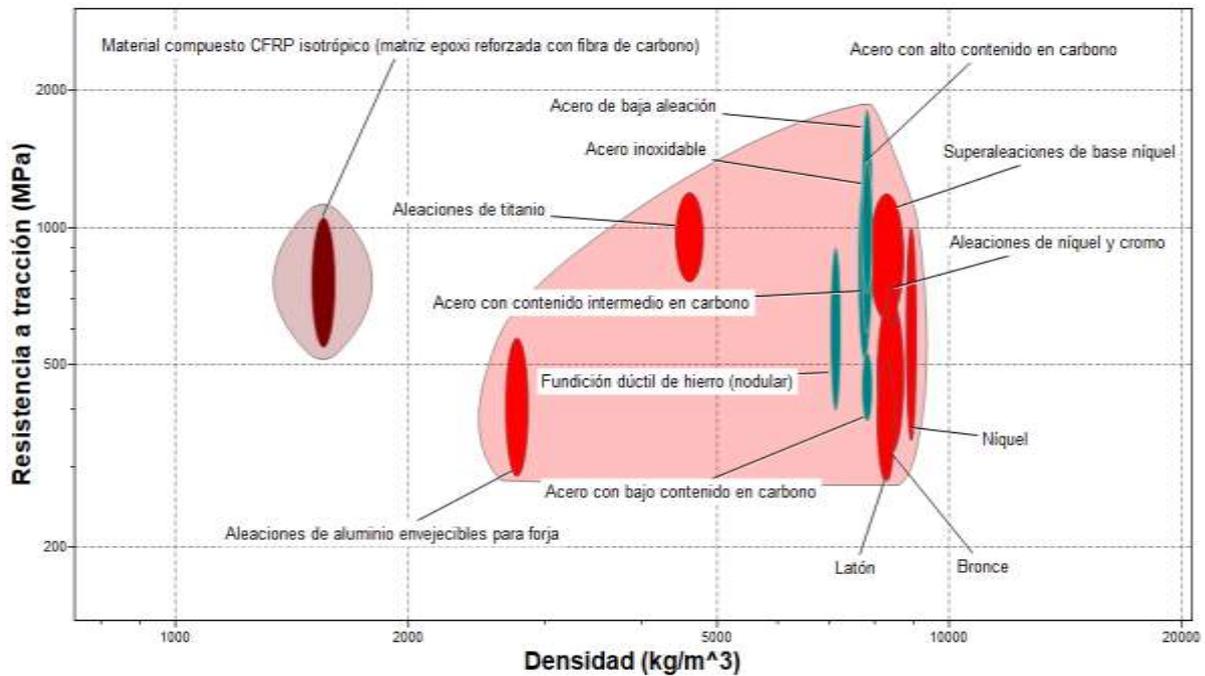


Figura 38. Gráfico Resistencia de tracción (MPa) vs Densidad (kg/m³)

Después de utilizar el software CES Edupack para reducir la lista de materiales aplicables al mecanismo piñón cremallera se tienen como candidatos los siguientes materiales: acero de baja aleación, acero inoxidable, acero con bajo contenido de carbono, acero con contenido de carbono intermedio, acero con alto contenido de carbono y fundición dúctil como se observa en la figura 39 y 40.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

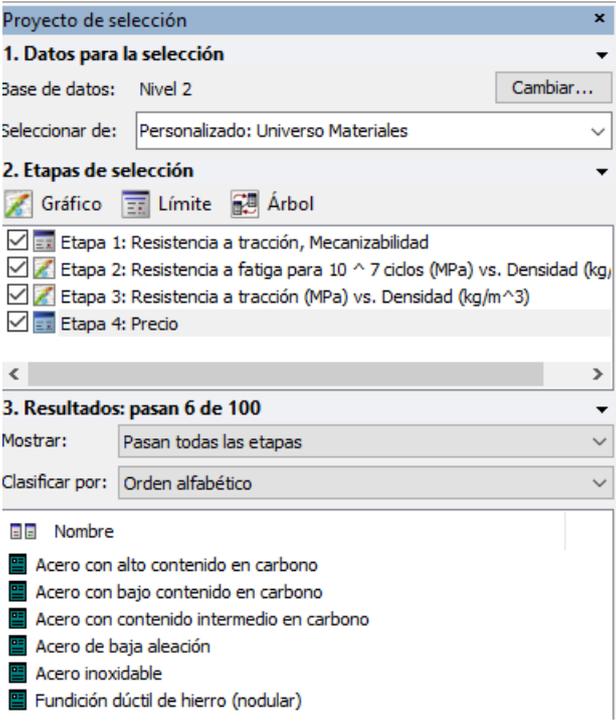


Figura 39. Resultados de Selección mediante CES Edupack

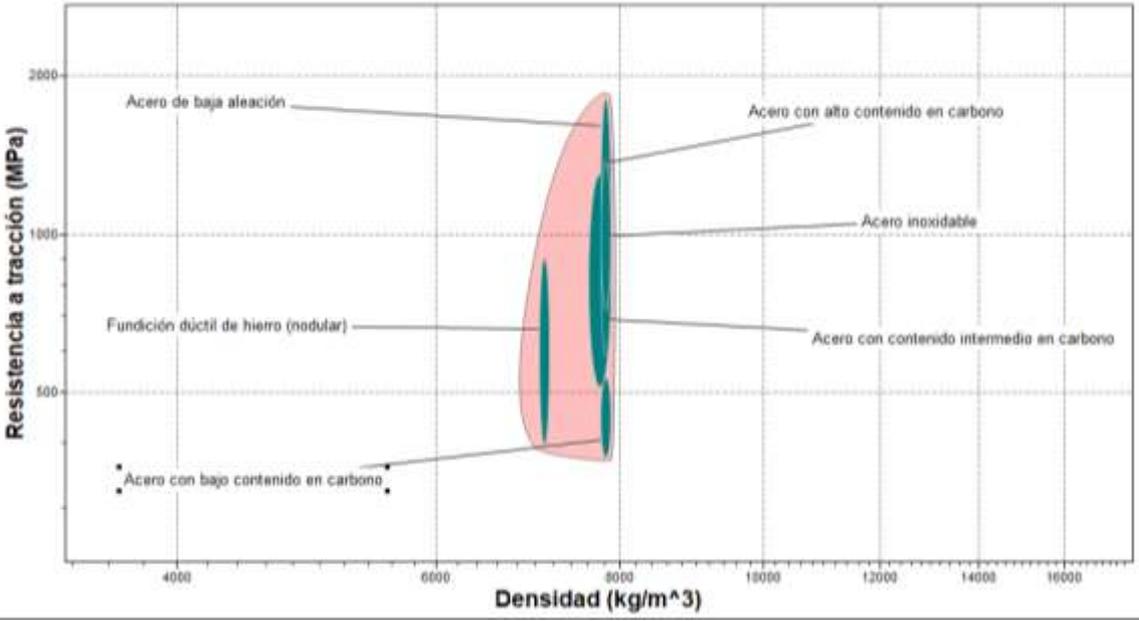


Figura 40. Grafico Resistencia de tracción (MPa) vs Densidad (kg/m³) de materiales elegidos.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Aplicación Método de entropía

Elegir la matriz de decisión empleada para el método, la matriz se ve en la Tabla 6.

Tabla 6.
Matriz estándar de decisión

Material	Precio (\$/kg)	Densidad (kg/m ³)	Módulo de Young (Gpa)	Limite elástico (Mpa)	Resistencia de tracción (Mpa)	% Elongación	Dureza Brinell (hbr)	Resistencia a fatiga (Mpa)
SAE 4140	0,78	7,85	210	686	882	12	275	314
AISI 303	3,25	7,98	220	241	621	50	160	542
SAE 5115	0,87	7,76	215	598	1070	11	405	224
SAE 1045	0,75	7,85	205	313	637	10	235	286
SAE 1050	0,78	7,85	200	580	748	20	217	310
SAE4340	0,78	7,85	190	686	980	12	330	352
SAE 1018	0,75	7,85	200	305	598	20	163	202

La matriz normalizada se obtiene aplicando la ecuación (2) y se expresa en la tabla 7

Tabla 7.
Matriz normalizada (entropía)

Pij	Precio (\$/Kg)	Densidad (Kg/m ³)	Módulo de young (GPa)	Limite elástico (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	% Elongación	Dureza brinell (Hbr)	Resistencia la fatiga (MPa)
SAE 4140	0,09799	0,14275	0,14583	0,20123	0,15932	0,08889	0,15406	0,14081
AISI 303	0,40829	0,14512	0,15278	0,07070	0,11217	0,37037	0,08964	0,24305

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

SAE								
5115	0,10930	0,14112	0,14931	0,17542	0,19328	0,08148	0,22689	0,10045
SAE								
1045	0,09422	0,14275	0,14236	0,09182	0,11507	0,07407	0,13165	0,12825
SAE								
1050	0,09799	0,14275	0,13889	0,17014	0,13512	0,14815	0,12157	0,13901
SAE								
4340	0,09799	0,14275	0,13194	0,20123	0,17702	0,08889	0,18487	0,15785
SAE								
1018	0,09422	0,14275	0,13889	0,08947	0,10802	0,14815	0,09132	0,09058

Aplicando la Ecuación (4) y (5), se obtiene los valores de e_j y d_j como se aprecia en la tabla 8 para con ellos determinar la entropía y los pesos para cada criterio.

Tabla 8.
Valores de e_j y d_j

	A	B	C	D	E	F	G	H
e_j	0,89195	0,99998	0,99946	0,96328	0,98765	0,90499	0,97366	0,97502
$\bar{e}_j = 1 - e_j$	0,10804	0,000015	0,00054	0,03672	0,01234	0,09500	0,02633	0,02497
$r_j = \bar{e}_j / \text{suma}(\bar{e}_j)$	0,35542	0,000048	0,00177	0,12079	0,04061	0,31252	0,08664	0,08217

Usando la ecuación (6) se determinan los pesos de cada criterio como se ve en la tabla 9.

Tabla 9.
Pesos obtenidos por Entropía

Criterio	A	B	C	D	E	F	G	H
w_j	0,35542	0,000048	0,00177	0,12079	0,04061	0,31252	0,08664	0,08217

Aplicación Método de desviación estándar

Tabla 10.
Método de desviación estándar

Material	Precio (\$/Kg)	Densidad (Kg/m ³)	Módulo de young (GPa)	Limite elástico (MPa)	Resistencia a la Tracción (MPa)	% Elongación	Dureza brinell (Bbr)	Resistencia la fatiga (MPa)

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

SAE/AISI 4140	0,78	7,85	210	686	882	12	275	314
SAE/AISI 303	3,25	7,98	220	241	621	50	160	542
SAE/AISI 5115	0,87	7,76	215	598	1070	11	405	224
SAE/AISI 1045	0,75	7,85	205	313	637	10	235	286
SAE/AISI 1050	0,78	7,85	200	580	748	20	217	310
SAE/AISI 4340	0,78	7,85	190	686	980	12	330	352
SAE/AISI 1018	0,75	7,85	200	305	598	20	163	202
Xprom (X1- xprom)^2	1,137	7,85571	205,71	487	790,8571	19,2857	255	318,5714
Raiz (x1- xprom)2/ 6	5,22	0,02	621,43	224088,	213556,86	1205,43	47858,	74725,71
	0,863	0,05949	9,4220	178,920	174,6657	13,1227	82,685	103,3203

Se aplican las ecuaciones (7) y (8) para obtener los pesos de los criterios según este método como podemos ver en la tabla 11.

Tabla 10.

Pesos obtenidos por desviación estándar

Criterio	A	B	C	D	E	F	G	H
Pesos	0,0015	0,00011	0,01673	0,3178	0,3102	0,02331	0,14685	0,1835

Aplicación método variación estadística

Tabla 12.

Método de Variación Estadística

Material	Precio (\$/Kg)	Densidad (Kg/m ³)	Módulo de young (GPa)	Limite elástico (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	% Elongación	Dureza brinell (Hbr)	Resistencia a la fatiga (MPa)
SAE 4140	0,24	0,98	0,95	1,00	0,82	0,24	0,68	0,58
AISI 303	1,00	1,00	1,00	0,35	0,58	1,00	0,40	1,00

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

SAE 5115	0,27	0,97	0,98	0,87	1,00	0,22	1,00	0,41
SAE 1045	0,23	0,98	0,93	0,46	0,60	0,20	0,58	0,53
SAE 1050	0,24	0,98	0,91	0,85	0,70	0,40	0,54	0,57
SAE 4340	0,24	0,98	0,86	1,00	0,92	0,24	0,81	0,65
SAE 1018	0,23	0,98	0,91	0,44	0,56	0,40	0,40	0,37
PROMEDIO (X1- XPROM)^2	0,35	0,98	0,94	0,71	0,74	0,39	0,63	0,59
Vj	57	5,6E-05	0,00183	0,068026	0,026647	0,06888	0,041682	0,036339

Se aplican las ecuaciones (9) y (10) para obtener la matriz normalizada y los valores de Vj respectivamente, estos valores de Vj que se ven en la tabla 13 serán los pesos de cada uno de los criterios considerados.

Tabla 13.
Pesos obtenidos por variación estadística

Criterio	A	B	C	D	E	F	G	H
Peso	0,22437	0,0002	0,00584	0,21661	0,08485	0,21934	0,13272	0,11571

A continuación en la tabla 14 se realiza una comparación entre los tres métodos desarrollados previamente con la finalidad de seleccionar uno para combinar los pesos con los métodos subjetivos MCDM y así lograr caracterizar los materiales en un ranking.

Tabla 14.
Comparación de métodos de ponderación

METODO	A	B	C	D	E	F	G	H
Entropía	0,35542	0,000048	0,00177	0,12079	0,04061	0,31252	0,08664	0,08217
Desv. Estándar Variac.	0,0015	0,00011	0,01673	0,3178	0,3102	0,02331	0,14685	0,1835
Estadist	0,22437	0,0002	0,00584	0,21661	0,08485	0,21934	0,13272	0,11571

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Como se observa en la figura 41 el método de entropía muestra un comportamiento nivelado y equitativo por lo se selecciona para el estudio de MCDM, con los valores de estos pesos y la lista de materiales se elegirán entre la lista de candidatos. Además según Salazar y Martinez-Gomez.(2019) el método de entropía considera la información equilibradamente entre los criterios lo que disminuye algún tipo de distorsión provocada por algún valor anormal y hace que el resultado sea más preciso y coherente, lo que respalda la decisión de tomar estos valores.

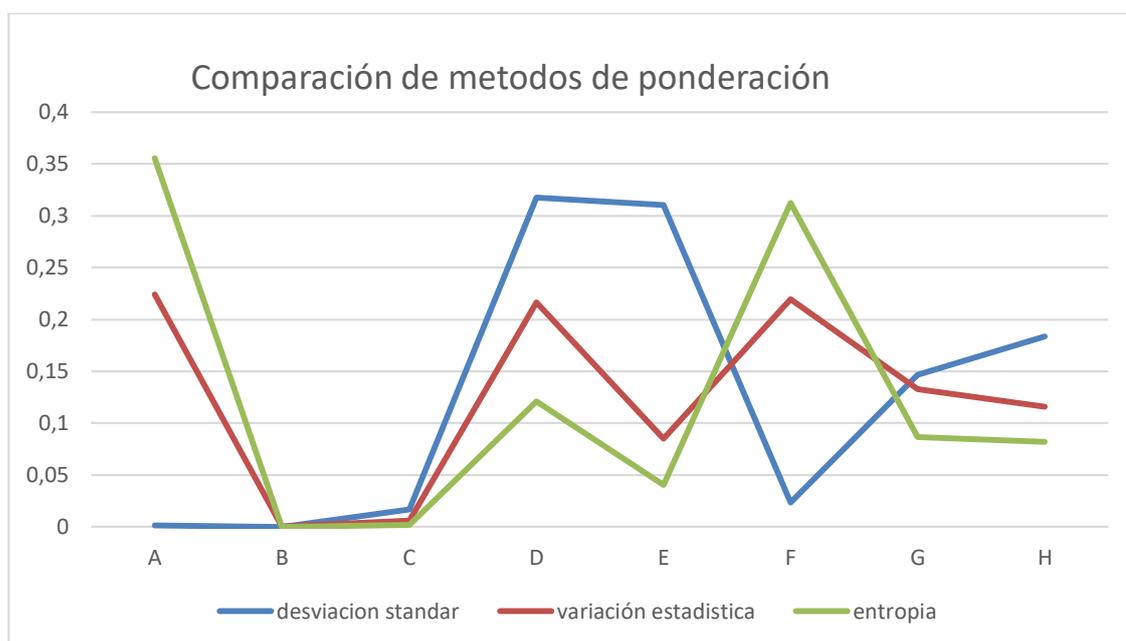


Figura 41. Cuadro comparación métodos de ponderación

Aplicación del método TOPSIS

Se emplea la ecuación (11) para obtener la matriz normalizada de decisión como se muestra en la tabla 15.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Tabla 15.
Matriz normalizada de decisión (TOPSIS)

Material	Precio (\$/Kg)	Densidad (Kg/m ³)	Módulo de young (GPa)	Limite elástico (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	% Elongación	Dureza a brinell (Hbr)	Resistencia a la fatiga (MPa)
SAE 4140	0,20649	0,37768	0,38543	0,49975	0,41160	0,19444	0,38773	0,35437
AISI 303	0,86035	0,38393	0,40379	0,17557	0,28980	0,81015	0,22559	0,61168
SAE 5115	0,23031	0,37335	0,39461	0,43564	0,49934	0,17823	0,57103	0,25280
SAE 1045	0,19854	0,37768	0,37626	0,22802	0,29727	0,16203	0,33134	0,32277
SAE 1050	0,20649	0,37768	0,36708	0,42253	0,34907	0,32406	0,30596	0,34986
SAE 4340	0,20649	0,37768	0,34873	0,49975	0,45734	0,19444	0,46528	0,39725
SAE 1018	0,19854	0,37768	0,36708	0,22219	0,27907	0,32406	0,22982	0,22797

A continuación se emplea la ecuación (12) para obtener los valores de la matriz de pesos estandarizada cuyos valores se muestran en la tabla 16.

Tabla 16.
Matriz estandarizada de pesos (TOPSIS)

Material	Precio (\$/Kg)	Densidad (Kg/m ³)	Módulo de young (GPa)	Limite elástico (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	% Elongación	Dureza a brinell (Hbr)	Resistencia a la fatiga (MPa)
SAE 4140	0,073390	0,000018	0,000685	0,060368	0,016719	0,060765	0,024052	0,029119
AISI 303	0,305792	0,000019	0,000718	0,021208	0,011772	0,253188	0,013994	0,050263
SAE 5115	0,081858	0,000018	0,000701	0,052624	0,020283	0,055701	0,035421	0,020773
SAE 1045	0,070567	0,000018	0,000669	0,027544	0,012075	0,050638	0,020553	0,026523
SAE 1050	0,073390	0,000018	0,000652	0,051040	0,014179	0,101275	0,018979	0,028748
SAE 4340	0,073390	0,000018	0,000620	0,060368	0,018577	0,060765	0,028862	0,032643
SAE 1018	0,070567	0,000018	0,000652	0,026840	0,011336	0,101275	0,014256	0,018733

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Mediante la aplicación de la ecuación (13) y (14) se obtiene la solución ideal positiva y negativa que resulta de los valores máximos y mínimos de cada criterio. En la tabla 17 se muestran dichos valores.

Tabla 17.

Soluciones ideales positivas y negativas

Criterio	A	B	C	D	E	F	G	H
Vj+	0,070567	0,000018	0,000718	0,060368	0,020283	0,044947	0,035421	0,050263
Vj-	0,305792	0,000019	0,000620	0,021208	0,011336	0,224737	0,013994	0,018733

Con la ecuación (15) y (16) encontramos la distancia hacia la solución positiva y solución negativa respectivamente como se muestra en la tabla 18.

Tabla 18.

Distancia entre soluciones ideales positivas + y negativas -

Material	Distancia +	Distancia -
SAE 4140	0,02417	0,23612
AISI 303	0,23943	0,03153
SAE 5115	0,03251	0,22715
SAE 1045	0,04315	0,23553
SAE 1050	0,02878	0,23458
SAE 4340	0,01901	0,23656
SAE 1018	0,05066	0,23529

Por último, con la ecuación (17) se obtiene la proximidad relativa a la solución ideal que es el resultado de dividir el valor de la solución ideal negativa para la suma de los 2 valores de las soluciones ideales. El ranking se representa en la tabla 19 donde la mejor opción es el SAE 1045 seguido del acero SAE 4340 debido a sus altos valores de resistencia la tracción y bajo porcentaje de elongación como se puede ver en la tabla 5 y el acero AISI

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

303 es el peor posicionado por su alto precio. El método TOPSIS se caracteriza por su racionalidad y transparencia de procedimiento, además de ser de fácil ejecución permite incluir los factores de costos y beneficio fácilmente en la operación y es muy aplicado en casos de análisis cualitativos y cuantitativos.(Ma et al., 2018a)

Tabla 19.
Solución relativa ideal y Ranking Topsis

Material	Cij	Ranking
SAE 4140	0,90713	2
SAE/AISI 303	0,11637	7
SAE 5115	0,87479	4
SAE 1045	0,84516	5
SAE 1050	0,89071	3
SAE 4340	0,92561	1
SAE 1018	0,82283	6

Aplicación método COPRAS

Utilizando la ecuación (18) y (19) se obtienen los valores para la matriz normalizada que se muestra en la tabla 20.

Tabla 20.
Matriz de decisión normalizada

r_{ij}	Precio (\$/Kg)	Densidad (Kg/m ³)	Módulo de young (GPa)	Limite elástico (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	% Elongación	Dureza brinell (Hbr)	Resistencia la fatiga (MPa)
SAE 4140	0,09799	0,14275	0,14583	0,20123	0,15932	0,08889	0,15406	0,14081
AISI 303	0,40829	0,14512	0,15278	0,07070	0,11217	0,37037	0,08964	0,24305
SAE 5115	0,10930	0,14112	0,14931	0,17542	0,19328	0,08148	0,22689	0,10045

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

SAE 1045	0,09422	0,14275	0,14236	0,09182	0,11507	0,07407	0,13165	0,12825
SAE 1050	0,09799	0,14275	0,13889	0,17014	0,13512	0,14815	0,12157	0,13901
SAE 4340	0,09799	0,14275	0,13194	0,20123	0,17702	0,08889	0,18487	0,15785
SAE 1018	0,09422	0,14275	0,13889	0,08947	0,10802	0,14815	0,09132	0,09058

Se aplica la ecuación (20) y se obtiene la matriz estandarizada de pesos que se ve a continuación en la tabla 21.

Tabla 21.

Matriz estandarizada de pesos

Vij	Precio (\$/Kg)	Densidad (Kg/m3)	Módulo de young (GPa)	Limite elástico (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	% Elongación	Dureza brinell (Hbr)	Resistencia la fatiga (MPa)
SAE 4140	0,034828	0,000007	0,00025	0,02430	0,00647	0,02778	0,00955	0,01157
AISI 303	0,145117	0,000007	0,00027	0,00854	0,00455	0,11574	0,00556	0,01997
SAE 5115	0,038847	0,000007	0,00026	0,02119	0,00785	0,02546	0,01407	0,00825
SAE 1045	0,033489	0,000007	0,00025	0,01109	0,00467	0,02315	0,00816	0,01053
SAE 1050	0,034828	0,000007	0,00024	0,02055	0,00548	0,04629	0,00754	0,01142
SAE 4340	0,034828	0,000007	0,00023	0,02430	0,00719	0,02778	0,01146	0,01297
SAE 1018	0,033489	0,000007	0,00024	0,01080	0,00438	0,04629	0,00566	0,00744

Aplicamos las ecuaciones (21) y (22) y se hallan los valores de los criterios favorables y no favorables basados en la tabla 3 de los criterios de evaluación. Los valores se pueden ver en la tabla 22 y tabla 23.

Tabla 22.

Criterios beneficioso

Material	Si+	Suma
1	S+1	0,05217
2	S+2	0,03890

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

3	S+3	0,05163
4	S+4	0,03472
5	S+5	0,04525
6	S+6	0,05617
7	S+7	0,02855
Suma Si +		0,307396

Tabla 23.

Criterio no beneficioso

Material	Si-	Suma
1		0,062615
2		0,260873
3		0,064318
4		0,056645
5		0,081134
6		0,062615
7		0,079795
Suma Si -		0,667995

Con la ecuación (23) encontramos los valores de prioridad o importancia relativa de cada opción o material como se observa en la tabla 24.

Tabla 24.

Importancia relativa

Material	Qij
1	1001,099
2	240,3102
3	974,5839
4	1106,576
5	772,5931
6	1001,103
7	785,5454

Finalmente con la ecuación (24) se calculan los valores del ranking, entre las alternativas, aquella con el mayor valor de proximidad relativa a la solución ideal es la mejor opción. Los valores del ranking se observan en la tabla 25.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Tabla 25.
Ranking COPRAS

Opción	Uij	Ranking
SAE 4140	90,468%	3
SAE/AISI 303	21,717%	7
SAE 5115	88,072%	4
SAE 1045	100,000%	1
SAE 1050	69,818%	6
SAE 4340	90,469%	2
SAE 1018	70,989%	5

Con la aplicación de este método la mejor opción es la opción numero 4 el acero SAE 1045 un acero de medio carbono con baja elongación y precio, seguido por el acero SAE 4340 con un contenido menor de carbono pero con propiedades de resistencia de alta y precio también bajo, no está lejos en el ranking el acero SAE 4140 con buena resistencia a la tracción y alto limite elástico, el último en el ranking es el AISI 303 por su alto porcentaje de elongación, bajo valor de elasticidad y alto precio.

Posteriormente en el análisis y discusión de resultados se comentara más a profundidad los resultados de cada método mediante una comparación entre los mismos.

Aplicación de método VIKOR

Empleando las ecuaciones (25) y (26) se obtiene la matriz normalizada, es decir resultan los mismos valores que en el método Topsis; y se determina la matriz normalizada por pesos como se observa en la tabla 26.

Tabla 26.
Matriz estandarizada por pesos (Vikor)

Material	Precio (\$/Kg)	Densidad (Kg/m3)	Módulo de young (GPa)	Limite elástico (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	% Elongación	Dureza brinell (Hbr)	Resistencia la fatiga (MPa)
----------	----------------	------------------	-----------------------	-----------------------	---------------------------------	--------------	----------------------	-----------------------------

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

SAE 4140	0,351161	0,000029	0,000592	0,000000	0,016179	0,2968 95	0,032914	0,055104
AISI 303	0,000000	0,000000	0,000000	0,120797	0,038640	0,0000 00	0,062031	0,000000
SAE 5115	0,338366	0,000048	0,000296	0,023888	0,000000	0,3047 08	0,000000	0,076855
SAE 1045	0,355426	0,000029	0,000889	0,101252	0,037263	0,3125 21	0,043042	0,061871
SAE 1050	0,351161	0,000029	0,001185	0,028774	0,027710	0,2343 91	0,047599	0,056070
SAE 4340	0,351161	0,000029	0,001777	0,000000	0,007745	0,2968 95	0,018989	0,045920
SAE 1018	0,355426	0,000029	0,001185	0,103424	0,040619	0,2343 91	0,061271	0,082172

A continuación se determina el máximo y mínimo de la función de cada criterio y esta matriz se presenta en la tabla 27.

Tabla 27.
Máximos y mínimos de cada criterio

	A	B	C	D	E	F	G	H
Máximo	0,355426	0,000048	0,001777	0,120797	0,040619	0,312521	0,062031	0,082172
Mínimo	0	0	0	0	0	0	0	0
Rango	0,355426	0,000048	0,001777	0,120797	0,040619	0,312521	0,062031	0,082172

Con las ecuaciones (27) y (28) se calculan los valores de los indicadores U_i y R_i como se puede observar en las tablas 28 y 29.

Tabla 28.
Indicador de medición R_i

Opción	Material	R_i
1	SAE 4140	0,351161
2	AISI 303	0,120797
3	SAE 5115	0,338366
4	SAE 1045	0,355426
5	SAE 1050	0,351161
6	SAE 4340	0,351161
7	SAE 1018	0,355426

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Máximo	0,355426
Mínimo	0,120797

Tabla 29.
Indicador de medición U_i

Opción	Material	U_i
1	SAE 4140	0,7528735
2	AISI 303	0,22146768
3	SAE 5115	0,74416101
4	SAE 1045	0,91229178
5	SAE 1050	0,74691904
6	SAE 4340	0,72251531
7	SAE 1018	0,87851639
	Máximo	0,91229178
	Mínimo	0,22146768

Por ultimo con la Ecuación (29), se obtiene el conjunto de soluciones óptimas y el ranking de los materiales donde la mejor opción es el SAE 1045 con un bajo precio y % de elongación, a su vez un valor alto de resistencia a la tracción y dureza, seguido del SAE 1018 un acero de bajo carbono con valores de resistencia a la tracción y dureza más bajos, el ultimo acero es el AISI 303 que tiene un precio elevado y bajo limite elástico que como se ve en la tabla 30.

Tabla 30.
Ranking Vikor

Opción	V_i	Ranking
SAE 4140	0,876	3
AISI 303	0,000	7
SAE 5115	0,842	6
SAE 1045	1,000	1
SAE 1050	0,871	4
SAE 4340	0,854	5
SAE 1018	0,976	2

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Resultados del análisis del ciclo de vida (LCA)

Después de completar los datos de la tabla 3 de los parámetros de cada material se puede acceder al informe que presenta entre otros, los datos de emisiones de CO₂ y consumo energético de cada material, datos necesarios para armar la matriz de decisión y aplicar los MCDM.

En la figura 42 se observa una tabla comparativa de como aporta cada proceso del ciclo de vida del material en su consumo de energía, claramente se ve que en su vida de uso como elemento montado en el auto es donde más energía requiere y demanda, debido a la duración del uso en este caso son 15 años, en la tabla 3 se pueden ver los detalles, después el indicador que tiene peso un peso menor pero considerable es en el proceso de extracción del material, siendo el más alto el del AISI 303 por ser un acero inoxidable que tiene algunos componentes adicionales al acero al carbono, como son los otros materiales.

El proceso de fabricación como se ha explicado antes ha mejorado con el tiempo y demanda un gasto energético menor, como se ve en la figura 3 es el tercer proceso más contaminante seguido de los indicadores de transporte y eliminación del material no menos importantes ya que pueden cambiar dependiendo del país de origen y destino del auto, así como de la disposición final que se da al material, este factor esta también relacionado con el potencial del fin de vida, que es un indicador del porcentaje de material reciclado en la pieza.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

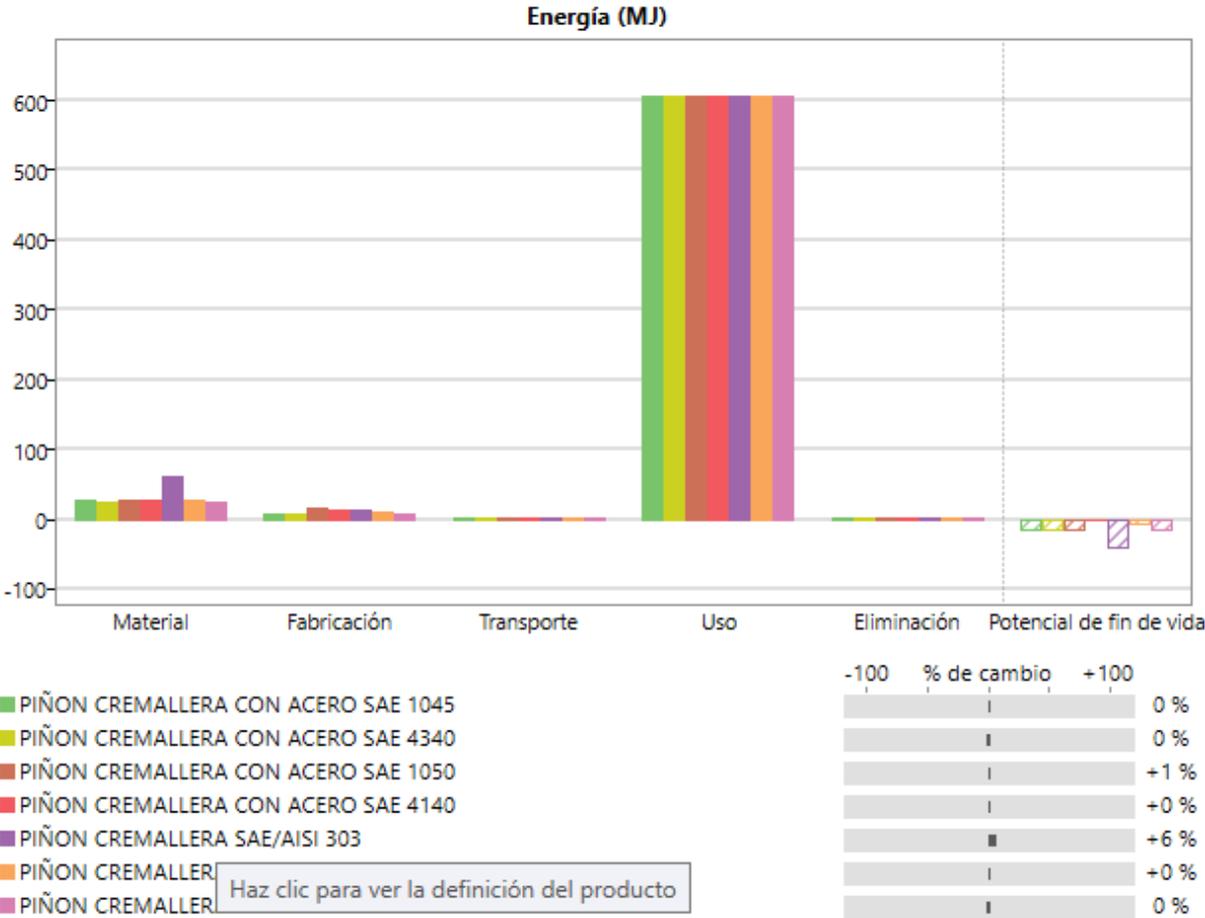


Figura 42. Cuadro comparativo de gasto de Energía de los materiales

En la figura 43 se observa una tabla comparativa como aporta cada proceso del ciclo de vida en la emisión de CO₂, el indicador de uso es el que más contribuyen a aumentar la huella de carbono, el nivel de emisiones es mayor que en las otras etapas del ciclo de vida del material por los 15 años de uso como parte de un automóvil. El proceso de extracción del material es siguiente en niveles de emisiones de CO₂, después viene la fabricación del elemento aunque se han innovado en los procesos de producción de acero y maquinado de piezas aún son procesos contaminantes a tomar en cuenta. El transporte y la eliminación son indicadores con valores más bajos, y el indicador de potencial de fin de vida, es una da una

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

idea del porcentaje de material reciclado de la pieza y también de la disposición final que tiene el elemento de estudio como es el piñón cremallera.

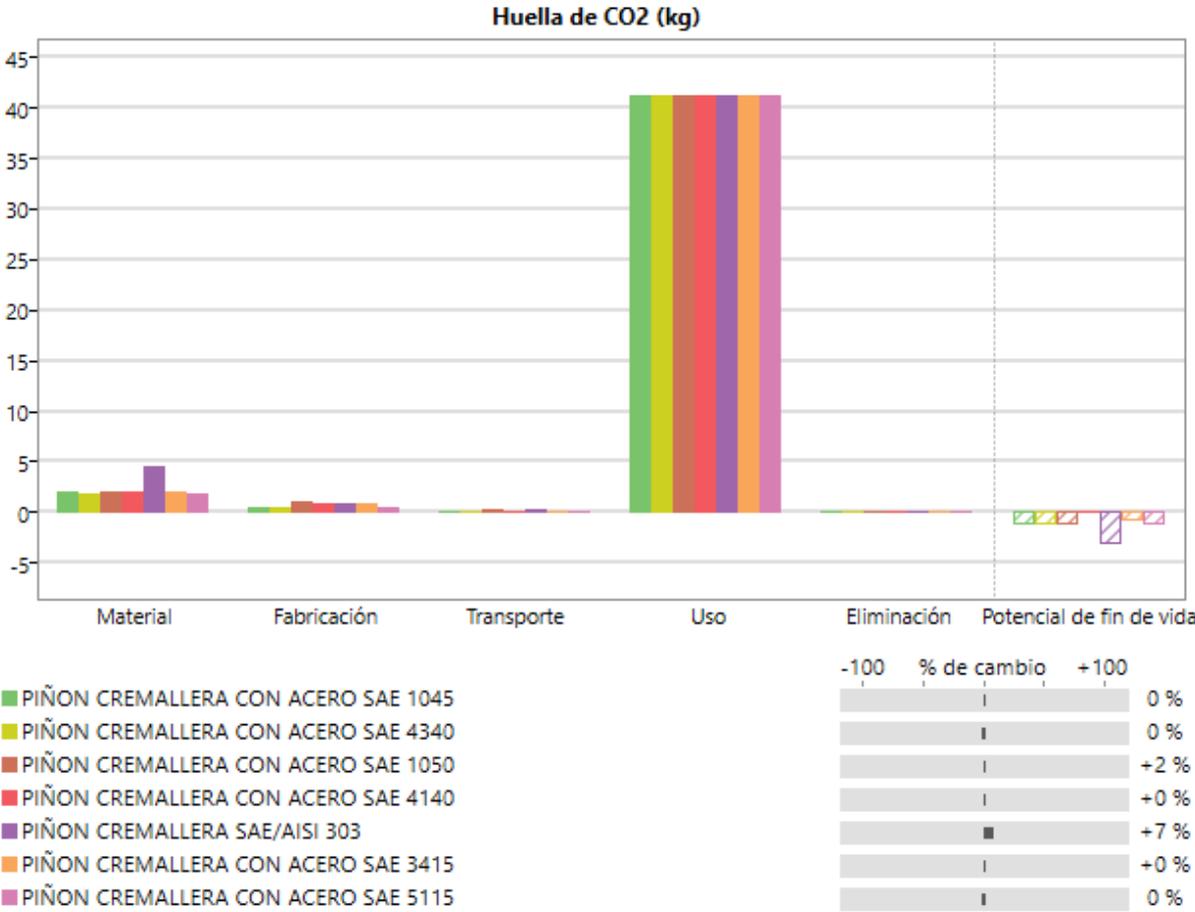


Figura 43. Cuadro comparativo de Huella de carbono de los materiales

Los valores que se buscan son los emisiones de CO₂ y consumo energético de cada material a lo largo de 15 años, por lo que se deben sumar los valores de cada proceso, a continuación en las figuras 44 y 45 se detallan los valores de huella de CO₂ y consumo de energía de cada material, que se obtendrá del informe dado por Eco Audit.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

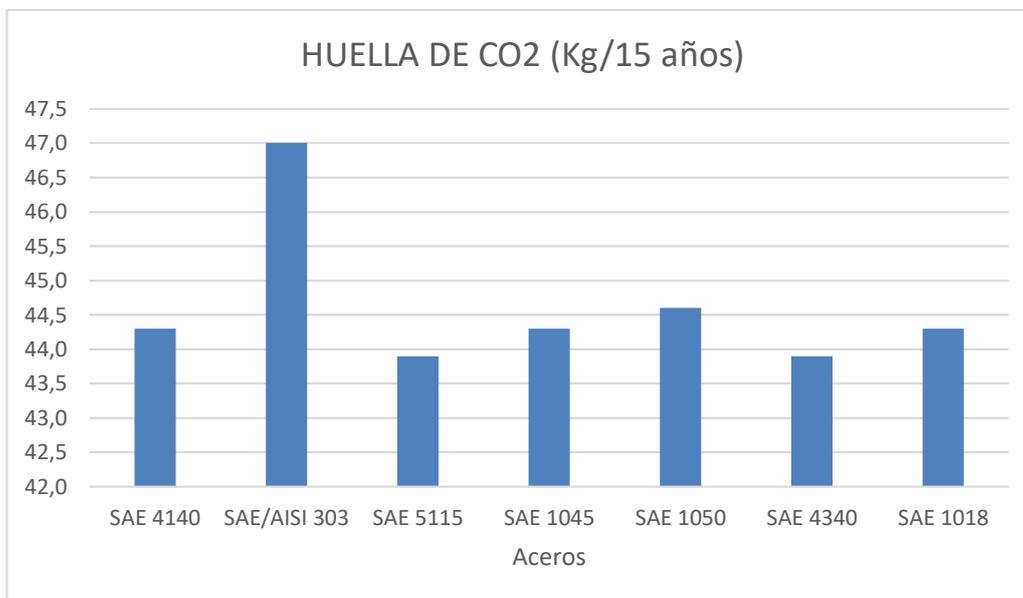


Figura 44. Comparación de huella de CO₂ entre aceros

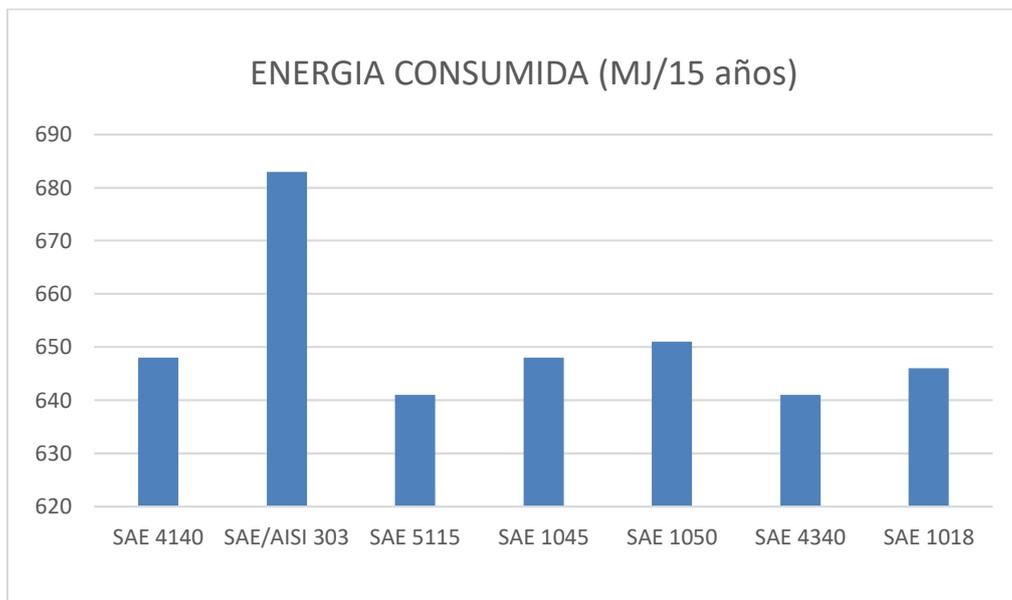


Figura 45. Comparación de energía consumida entre aceros

Con los resultados de las gráficas anteriores que se obtienen con la herramienta Eco Audit del software EduPack podemos armar la tabla 31 que servirá para determinar el ranking de materiales que considere factores ambientales, aplicando los métodos multicriterio.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Tabla 31.
Criterios ambientales por materiales

OPCION	MATERIAL	HUELLA DE CO2 (Kg/año)	ENERGIA CONSUMIDA (MJ/año)
1	SAE 4140	44,3	648
2	SAE/AISI 303	47,0	683
3	SAE 5115	43,9	641
4	SAE 1045	44,3	648
5	SAE 1050	44,6	651
6	SAE 4340	43,9	641
7	SAE 1018	44,3	646

Aplicación Método de entropía-topsis para obtener el ranking con criterios ambientales

Elegir la matriz de decisión empleada para el método de entropía y obtener los pesos de los criterios, la matriz se ve en la Tabla 31. Con los valores de esta matriz aplicamos la formula (2), para obtener la matriz estandarizada de decisión que se muestra en la tabla 32.

Tabla 32.
Matriz ambiental normalizada (entropía)

Material	Huella de CO ₂ (kg/año)	Energía consumida (mj/año)
SAE 4140	0,141851	0,142168
SAE/AISI 303	0,150496	0,149846
SAE 5115	0,140570	0,140632
SAE 1045	0,141851	0,142168
SAE 1050	0,142811	0,142826
SAE 4340	0,140570	0,140632
SAE 1018	0,141851	0,141729

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Aplicando la Ecuación (4) y (5), se obtiene los valores de e_j y d_j como se aprecia en la tabla 33, para con ellos determinar los pesos para cada criterio ambiental.

Tabla 33.
Valores de d_j y e_j

	CO ₂	Consumo Energético
e_j	0,99987	0,99989
$1-e_j$	0,00013	0,00011
r_j	0,54060	0,45940

Usando la ecuación (6) se determinan los pesos de cada criterio como se ve en la tabla 34.

Tabla 34.
Pesos Criterios Ambientales por Entropía

Criterio	CO ₂	Consumo Energético
Peso	0,54060	0,45940

Con estos valores de los criterios ambientales vamos al método topsis, para conseguir el ranking de materiales considerando los criterios ambientales de huella de CO₂ y consumo de energía anual.

Aplicación del método Topsis con los pesos de entropía de los criterios ambientales de la tabla 34. Primero se debe obtener la matriz normalizada de decisión aplicando la ecuación (11) y los valores se muestran en la tabla 35.

Tabla 35.
Matriz normalizada de decisión Topsis LCA

Opción	Material	Huella de co2 (Kg/15 años)	Energía consumida (MJ/15 años)
1	SAE 4140	0,4048	0,3761
2	SAE/AISI 303	0,4295	0,3964
3	SAE 5115	0,4011	0,3720
4	SAE 1045	0,4048	0,3761
5	SAE 1050	0,4075	0,3778
6	SAE 4340	0,4011	0,3720

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

7	SAE 1018	0,4048	0,3749
Pesos Entropía LCA (wj)		0,6732	0,3267

A continuación se emplea la ecuación (12) para obtener los valores de la matriz de pesos normalizada cuyos valores se muestran en la tabla 36.

Tabla 36.
Matriz estandarizada de pesos Topsis LCA

Opción	Material	Huella de co2 (Kg/15 años)	Energía consumida (MJ/15 años)
1	SAE 4140	0,20284	0,17276
2	SAE/AISI 303	0,21520	0,18209
3	SAE 5115	0,20101	0,17090
4	SAE 1045	0,20284	0,17276
5	SAE 1050	0,20421	0,17356
6	SAE 4340	0,20101	0,17090
7	SAE 3415	0,20284	0,17223

Mediante la aplicación de la ecuación (13) y (14) se obtiene la solución ideal positiva y negativa que resulta de los valores máximos y mínimos de cada criterio. En la tabla 37 se muestran dichos valores.

Tabla 37.
Soluciones ideales positivas y negativas

Criterio	A	B
Vj+	0,2010057	0,1708957
Vj-	0,2151997	0,1820932

Con la ecuación (15) y (16) encontramos la distancia hacia la solución positiva y solución negativa respectivamente como se muestra en la tabla 38.

Tabla 38.
Distancia entre soluciones ideales + y -

Material	Distancia +	Distancia -
SAE 4140	0,00261	0,015489
SAE/AISI 303	0,01808	0,000000
SAE 5115	0,00000	0,018079
SAE 1045	0,00261	0,015489

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

SAE 1050	0,00417	0,013912
SAE 4340	0,00000	0,018079
SAE 3415	0,00227	0,015816

Por último, con la ecuación (17) se obtiene la proximidad relativa a la solución ideal que es el resultado de dividir el valor de la solución ideal negativa para la suma de los 2 valores de las soluciones ideales. El ranking se representa en la tabla 39, el primer material candidato es el SAE 4340.

Tabla 39.
Solución relativa ideal y Ranking Ambiental

Material	Cij	ranking
SAE 4140	0,8556	5
SAE/AISI 303	0	7
SAE 5115	0,9990	2
SAE 1045	0,8556	4
SAE 1050	0,7694	6
SAE 4340	1	1
SAE 3415	0,8747	3

Con los resultados de la tabla 39 se ha concluido con la metodología de selección del material, se han aplicado los métodos multicriterios tomando en cuenta las propiedades mecánicas lo que es un análisis tradicional, y posteriormente se realizó un análisis de ciclo de vida (LCA) para obtener los valores de los criterio ambientales y así determinar el ranking ambiental y compararlo con los rankings obtenidos en el análisis multicriterio topsis, copras y Vikor antes calculados como se detalla a continuación en la tabla 40 en la comparación de métodos MCDM y se puede ver gráficamente en la figura 46.

Tabla 40.
Comparación de ranking de métodos multicriterio

OPCION	MATERIAL	Ranking TOPSIS	Ranking COPRAS	Ranking VIKOR	Ranking Ambiental
---------------	-----------------	-----------------------	-----------------------	----------------------	--------------------------

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

1	SAE 4140	2	3	3	5
2	SAE/AISI 303	7	7	7	7
3	SAE 5115	4	4	6	2
4	SAE 1045	5	1	1	4
5	SAE 1050	3	6	4	6
6	SAE 4340	1	2	5	1
7	SAE 3415	6	5	2	3

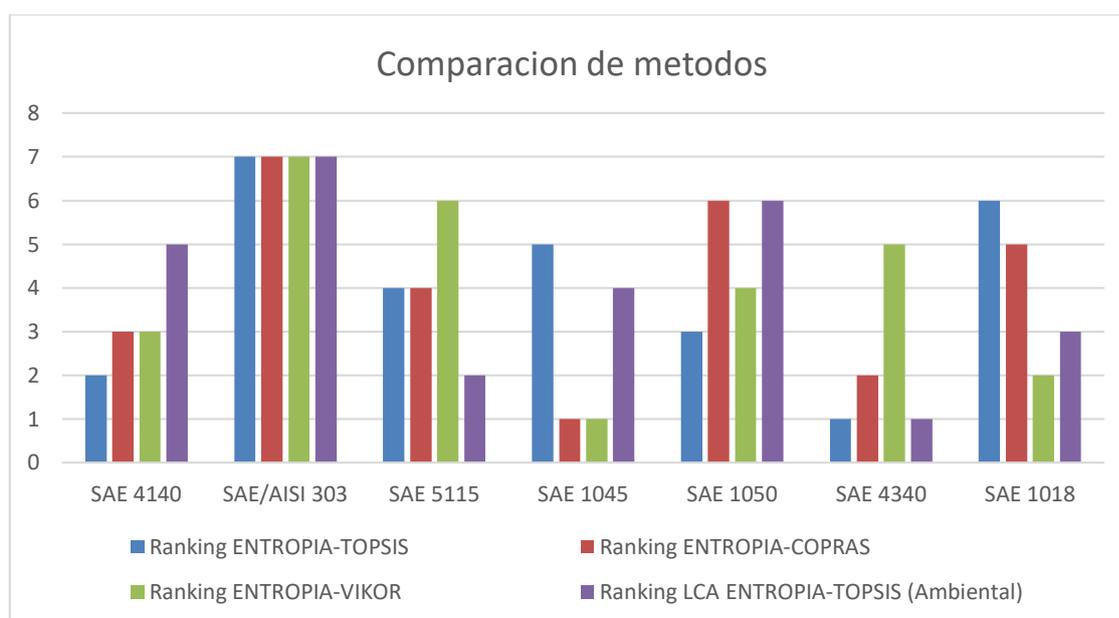


Figura 46. Comparación de ranking de aceros por métodos

Elección del material seleccionado

Analizando la gráfica comparativa de los métodos se observa 2 opciones de materiales candidatos

- El primero es el **Acero 4340** que es la primera opción del ranking Topsis-ambiental, pero también es la segunda opción del método Topsis y segunda opción del Copras.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

- El segundo es el **SAE 1045, que sin tener en cuenta el ranking ambiental sería el material elegido según el grafico 46**, es la primera opción según el ranking Vikor y Copras. Sin embargo no tiene una buena posición en el ranking ambiental y de entropía.

El SAE 1045 es un acero de cementación aleado al cromo-manganeso de uso universal utilizado en piezas sometidas a medianas sollicitaciones mecánicas que requieran una superficie dura y un núcleo tenaz. Acero apto para el temple directo.

Componentes de ingeniería mecánica tales como: piñones, árboles de levas, cuerpos de válvulas, engranajes, pasadores, ruedas dentadas, etc. (*Aceros de Cementación*, 2010; Unido, 2010)

El acero 4340 o 17NiCrMo6-4 (UNI 10084) es la nueva designación de 18NiCrMo5 (UNI 7846). Es el acero de endurecimiento de cajas más común y tiene una templabilidad media-alta y una buena maquinabilidad. Después de los tratamientos de endurecimiento y endurecimiento de la carcasa, la superficie alcanza una dureza elevada. 17NiCrMo6-4 se utiliza para la producción de piezas mecánicas, que se someten a desgaste (engranajes, árboles de levas, bujes, piñones) (*DINI.6566 17NiCrMo6-4 18NiCrMo5 817M17 SAE4317 Acero de Endurecimiento de Caja | Fushun Special Steel Co., Ltd. - Proveedor Profesional de Acero Especial y Fabricante de Acero Para Herramientas*, n.d.)

Analizando el grafico de la figura 46 se ve que cada método tiene una prioridad o ranking distinto, no existen coincidencias, sin embargo de acuerdo al alcance del estudio con el objetivo establecido de seleccionar el material sostenible más adecuado para el sistema piñón cremallera, se toma la opción que brinda el ranking topsis ambiental que se muestra en la

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

figura 46, es el **Acero 4340 y 1045** las propiedades de estos materiales se pueden observar en la tabla 3, con los datos de este material se procede a realizar la simulación del comportamiento en un mecanismo piñón cremallera.

Correlación de Spearman

En la siguiente tabla 41 se muestran los resultados de correlación de spearman entre los ranking de los distintos métodos multicriterio utilizados

Tabla 41.
Correlaciones de Spearman

			Ranking Topsis	Ranking Vikor	Ranking Copras	Ranking Ambiental
Rho de Spear man	Ranking Topsis	Coefficiente de correlación	1,000	0,036	0,500	0,429
		Sig. (bilateral)	.	0,939	0,253	0,337
		N	7	7	7	7
Ranking Vikor	Ranking Vikor	Coefficiente de correlación	0,036	1,000	0,536	0,107
		Sig. (bilateral)	0,939	.	0,215	0,819
		N	7	7	7	7
Ranking Copras	Ranking Copras	Coefficiente de correlación	0,500	0,536	1,000	0,607
		Sig. (bilateral)	,253	,215	.	0,148
		N	7	7	7	7
Ranking Ambient al	Ranking Ambient al	Coefficiente de correlación	0,429	0,107	0,607	1,000
		Sig. (bilateral)	0,337	0,819	0,148	.
		N	7	7	7	7

Analizando los resultados y de acuerdo a la teoría del coeficiente de spearman, se puede observar como existe una correlación moderada entre los resultados del método topsis

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

y copras con valor de 0,5 y ambiental con valor de 0,429, sin embargo presenta una correlación baja con el ranking topsis.

También el ranking copras presenta una relación moderada con el ranking ambiental llegando a un valor de 0,607 y con el ranking Vikor de 0,536.

Cálculos del piñón- cremallera

Después de aplicar las formulas de la tabla 4 obtenemos los valores la siguiente tabla 42 que se utiliza para dibujar el perfil de los dientes de engrane y los cálculos de los esfuerzos.

Tabla 42.
Resultados de cálculos del mecanismo piñón cremallera

ítem	símbolo	formula	piñón	cremallera
modulo	m		2	
ángulo presión	Φ		20°	
# dientes	Zp	$Z_p=(2*ha)/m*\text{sen}^2\alpha$	20	30
altura de la cremallera	H			
paso primitivo	P	$P=m*\pi$	6,28	
diámetro primitivo	dp	$dp=m*Z$	40	
diámetro exterior	da	$da=dp+2m$	44	
diámetro de fondo	df	$df=dp-2.5m$	35	
diámetro base	db	$db=dp*\text{cos } \alpha$	16,3233	
altura del diente	h	$h=2,25*m$	4,5	4,5
altura de cabeza del diente	ha	$ha=m$	2	2
altura del pie del diente	hf	$hf=1.25*m$	2,5	2,5
claro	c	$0,25*m$	0,5	0,5
espesor diente	e	$1,5708*m$	3,1416	3,1416
ancho diente	B	$(10-15)*m$	21mm	21mm
avance	A	$A=\pi*dp$	125,6 mm	
velocidad de la cremallera	Va	$Va=dp/2$	20	
revoluciones cremallera	Np	$N_p=(V_a*60)/A$	9,55 rpm	
Cos (ángulo de presión)	Cos(Φ)		0,4080	

Para obtener el torque en el engrane utilizamos la ecuación 46 como se detalla a continuación.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

$$Tk = W * u \sqrt{\frac{B^2}{8} + E^2}$$

Se asumirán algunos valores y otros se tomaran de una ficha técnica de un automóvil en este caso se ha tomado la ficha técnica del Chevrolet Aveo family, un automóvil común en el Ecuador de gran demanda por su bajo costo.

Para W se toma en cuenta el peso del auto sobre el eje delantero que según (*Zero Turn Radius Report - Team Panache (1)*, n.d.). Se puede considerar W como 40% del peso total del vehículo que se ve en la tabla 42

El valor de E se supone 5,1”

B es el ancho de la llanta será tomado de la ficha técnica antes seleccionada(General Motors Company, 2013)

El valor de u (fricción) se puede calcular con la relación E/B como se ve en la figura 43.

Tabla 43

PESOS Y CAPACIDADES	1.6 L M/T AC
Peso vacío (kg)	1120
Peso bruto vehicular (kg)	1535
Capacidad de carga (kg)	415
Volumen en área de carga (lts)	351
Tanque de combustible (gal/L)	11,88 / 45
Capacidad de pasajeros	5

Tabla 44

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

CHASIS		1.6 L M/T AC
Dirección		Asistida hidráulicamente
Radio de giro mínimo/pared a pared (mts)		4.89 / 5.12
Suspensión	Delantera	Independiente McPherson
	Trasera	Barra de torsión
Amortiguador (delt./tras.)		Hidráulicos telescópicos
Barra estabilizadora (del./tras.)		Delantera
Sistema de freno	Tipo	Doble en diagonal
	Delantera	Discos
	Trasera	Tambor
ABS		No
Freno mano		Mecánico sobre ruedas traseras
Llantas		185 / 60R14
Rines		Aluminio 5,5x14", repuesto de acero 5,5x14".

$$Tk = (614 \text{ kg}) * (0,2) * \sqrt{\frac{(7,28")^2}{8} + (5,1")^2}$$

$$Tk = 122,8 + 5,79 \text{ lbs - pulg}$$

$$Tk = 128,6 \text{ lb - pulg}$$

$$Tk = 14,46 \text{ N - m}$$

El Torque en el piñón queda definido por la siguiente formula

$$\text{Torque en piñon} = \frac{Tk * (\text{radio de giro})}{\text{diametro del piñon}}$$

El radio de giro se lo toma de la tabla 43 y en la tabla 44 se selecciona el valor correspondiente.

Tabla 45. Relación entre Tamaños de piñón y radio de giro

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Pinion Size	Steering Ratio	Steering Effort	Steering L-L Angle	Gear Ratio
15mm	11.2 : 1	31.2 N	970° (2.69 turns)	0.37
21mm	8 : 1	43.68 N	693° (1.925 turns)	0.51
27mm	6.2 : 1	56.01 N	540° (1.5 turns)	0.66
33mm	5 : 1	68.64 N	440° (1.22 turns)	0.81
39mm	4.3 : 1	81.05 N	373° (1.03 turns)	0.962



$$\text{Torque en piñon} = \frac{14,46 * (0,81)}{0,044}$$

$$\text{Torque en el piñon} = 266,2 \text{ N}$$

La resistencia a la flexión del diente del engranaje es la carga tangencial máxima que el diente del engranaje puede soportar sin dañar el diente.

- Suposiciones en el análisis de la resistencia de la flexión

- 1) La carga completa está actuando en la punta de un solo diente
- 2) El efecto de la fuerza radial se desprecia
- 3) La carga se distribuye uniformemente en todo el ancho de la cara
- 4) Se desprecia el efecto de la concentración de estrés.
- 5) Se desprecia la fuerza de fricción debido al deslizamiento de los dientes.

Los dos modos de falla principales para engranajes son:

- 1) Rotura de los dientes: por tensión de flexión excesiva, y
- 2) picadura superficial / desgaste de la superficie: por estrés de contacto excesivo.

En la tabla 46 se muestran los datos a tener en cuenta para simulación

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Tabla 46
Datos para cálculos

Material	Piñon Cremallera		
	Dientes	20	30
SAE			
acero	4340	m=	2
Sut=	880 MPa	Ka=	1
S=	560 MPa	Km=	1.3
E=	190 GPa	Kv=	0,768
Poisson=	0,33	B=	20 mm

Esfuerzo de flexión

σ_p = esfuerzo de flexión en el piñón

$$\sigma_p = \frac{Sut}{3} = \frac{980}{3} \text{Mpa} \quad \sigma_p = 326,66 \text{ N}$$

σ_c = esfuerzo de flexión en cremallera

$$\sigma_c = \frac{Sut}{3} = \frac{980}{3} \text{Mpa} \quad \sigma_c = 326,66 \text{ N}$$

Factor de Lewis (Y)

$$Y_p = 0,484 - \frac{2,87}{z_p} \quad Y_p = 0,484 - \frac{2,87}{20} \quad Y_p = 0,314$$

$$Y_c = 0,484 - \frac{2,87}{z_c} \quad Y_c = 0,484 - \frac{2,87}{30} \quad Y_c = 0,389$$

$$\sigma_p * Y_p \leq \sigma_c * Y_c$$

$$326,66 * 0,314 \leq 326,66 * 0,389$$

$$102,57 \leq 127,07$$

Este valor menor de la relación el factor de Lewis y el esfuerzo de flexión entre el piñón y la cremallera quiere decir que el piñón es más propenso a fallas por flexión que la cremallera, por lo que se analizara el esfuerzo permisible en el mismo.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

$$\sigma = \frac{Kv*Wt}{B*m*Y}$$

$$Wt = \sigma p * B * m * Y$$

$$Wt = 326,66 * 21 * 2 * 0,314$$

$$Wt = 4308 N$$

$$\sigma = \frac{Wt}{Kv*B*m*Y}$$

$$\sigma_{max} = \frac{4308}{0,769}$$

$$\sigma_{max} = 5602 psi$$

$$\sigma_{max} = 38,62 Mpa$$

Resultados de la simulación y comparación con cálculos

El análisis de elementos finitos es la solución numérica de los componentes mecánicos de comportamiento que se adquieren mediante la discretización de los componentes mecánicos en un pequeño número finito de bloques de construcción (conocidos como elementos) y mediante el análisis de los componentes mecánicos por su aceptabilidad y fiabilidad. El modelo de contacto de engranajes rectos se genera en el paquete de software ANSYS 20 como se muestra en la figura 37 donde se muestra el modelo de elementos finitos de los pares de engranajes helicoidales con condiciones de contorno aplicadas. Se utiliza la malla tetraédrica 3D para la generación de malla de los modelos de engranajes (Venkatesh y Murthy, 2014).

Deformación SAE 4340

En la figura 47 se puede observar los resultados de deformación que se produce en la zona de contacto de los dientes al aplicar el momento de 266 Nm. Esta deformación llega hasta

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

0.0467 mm, esta deformación es casi imperceptible, pero con el tiempo produce desgaste de la superficie, como se ve en la figura la mayor deformación se produce en la mitad del diente hacia la punta, si la deformación es excesiva se puede producir rotura del diente tempranamente. Con los valores obtenidos se puede determinar que el acero SAE 4340 tiene un buen desempeño para la aplicación requerida.

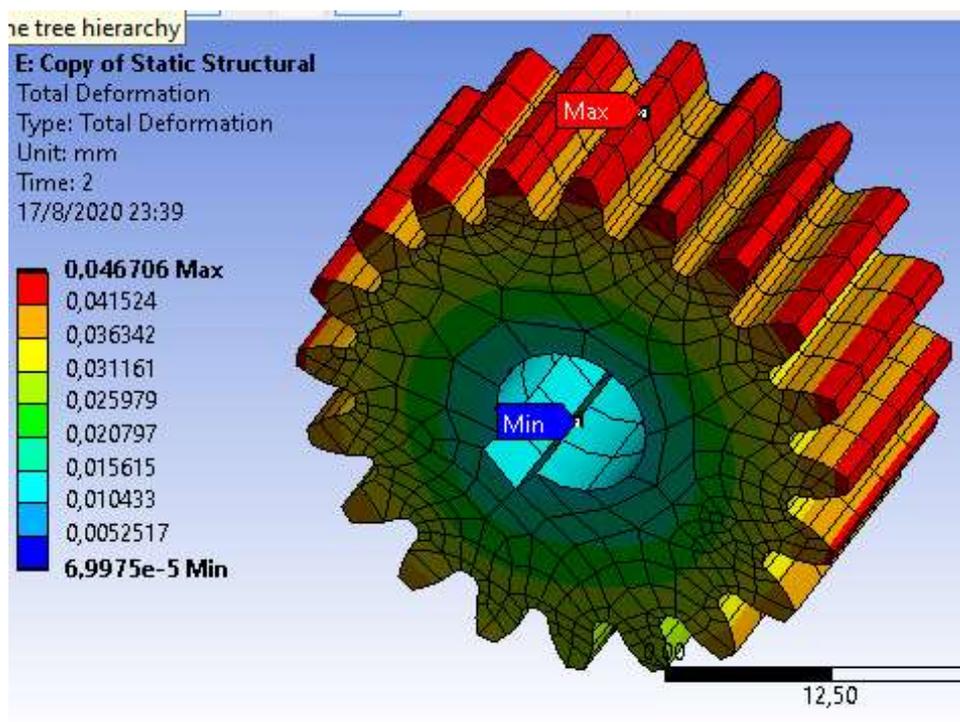


Figura 47. Deformación total SAE 4340

Esfuerzo Von Misses SAE 4340

En la siguiente figura se puede observar que la parte del engrane que sufre mayor esfuerzo es el diente, en la cara donde tiene contacto con los dientes de la cremallera, en la zona de la involuta y en la base del diente o flancos, el máximo esfuerzo es de 405,38 MPa que está dentro de valor de resistencia del material que es de 980 MPa y el promedio es de

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

26,97 MPa como se ve en la figura 48, este promedio no supera el esfuerzo máximo permisible de 38,6 MPa calculado anteriormente con la ecuación 47. Estos resultados respaldan la selección del material SAE 4340 ya que los valores están dentro de los rangos permitidos.

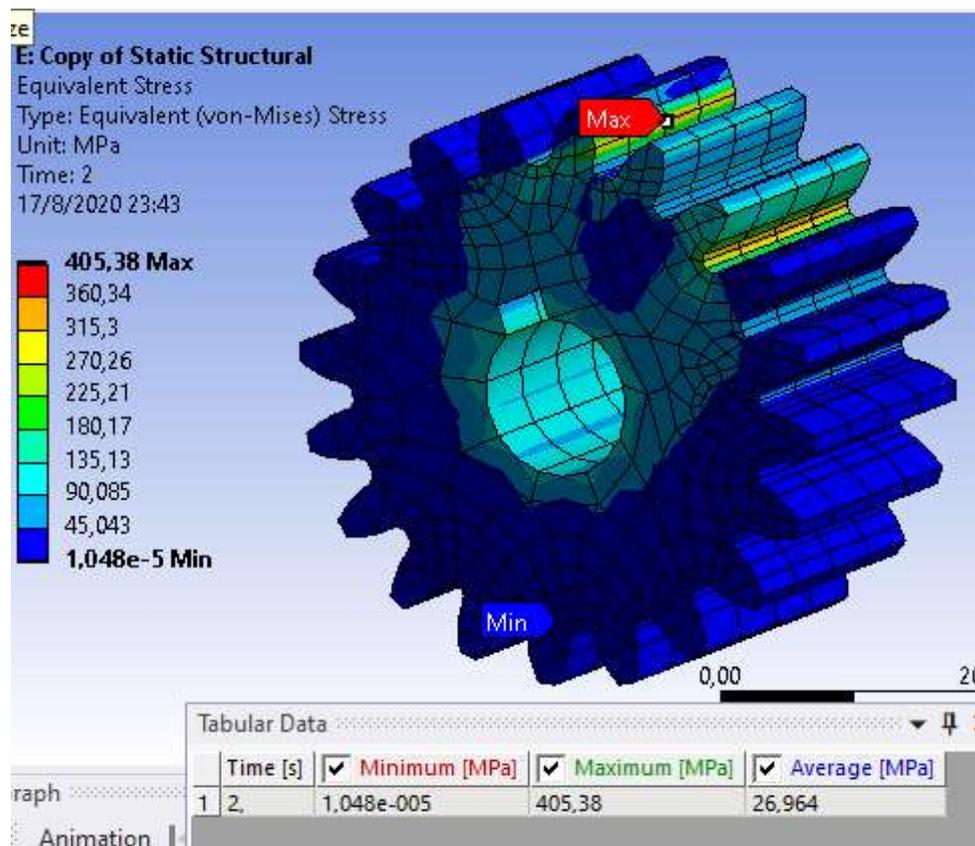


Figura 48. Esfuerzo de Von Misses SAE 4340

Factor de seguridad SAE 4340

La figura 49 se puede ver los valores del factor de seguridad es de 1,75, este valor es superior a los valores de las tablas de factor de seguridad en engranes que dice que debe ser mayor a 1,3, este valor obtenido en la simulación se compara con el valor obtenido por los cálculos. Pero ya sabiendo que el factor de seguridad es mayor al establecido en libros y

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

catálogos para los mecanismos piñón cremallera se puede decir que la selección del material es correcta, la simulación y diseño del engrane.

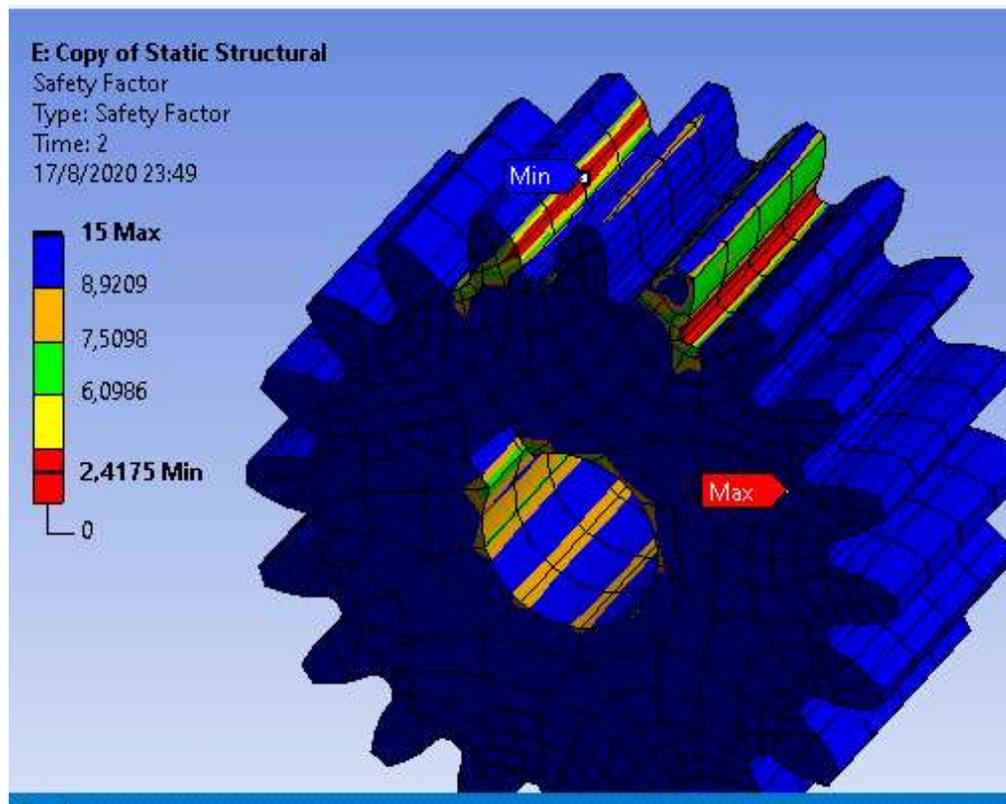


Figura 49. Factor de seguridad SAE 4340

Cálculos de factor de seguridad SAE 4340

De la ecuación 49 se despeja el factor de seguridad (Sf), los valores de YN, Kt y Kr ya se explicaron antes y se obtiene de las tablas del capítulo 14 del libro de Shigley.

$$\text{Esfuerzo a fatiga permisible} = \frac{St}{Sf} \frac{YN}{Kt * Kr}$$

$$Sf = \frac{St}{\sigma_{perm}} \frac{YN}{Kt * Kr}$$

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

$$Sf = \frac{980}{326,66} \left(\frac{0,9}{1 * 1,5} \right)$$

$$Sf = 1,81$$

Comparación de resultado de simulación y cálculos (SAE 4340)

En la figura 50 y 51 se tiene las tablas comparativas entre la simulación y los cálculos aplicando las fórmulas de engranes y cálculos de esfuerzo y factor de seguridad. Como se observa el esfuerzo generado por el momento aplicado al realizar un giro no sobrepasa es esfuerzo permisible calculado. Y el factor de seguridad tiene una diferencia de 0,6 entre la simulación y el cálculo.

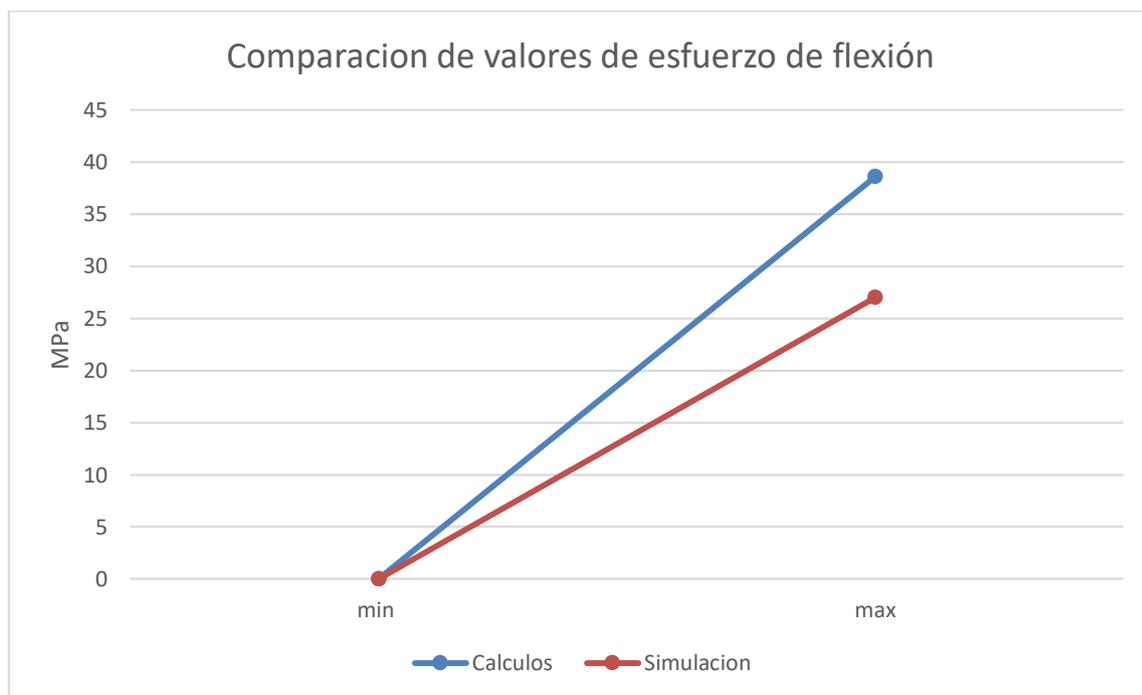


Figura 50. Tabla comparativa de resultados de cálculos y simulación SAE 4340

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

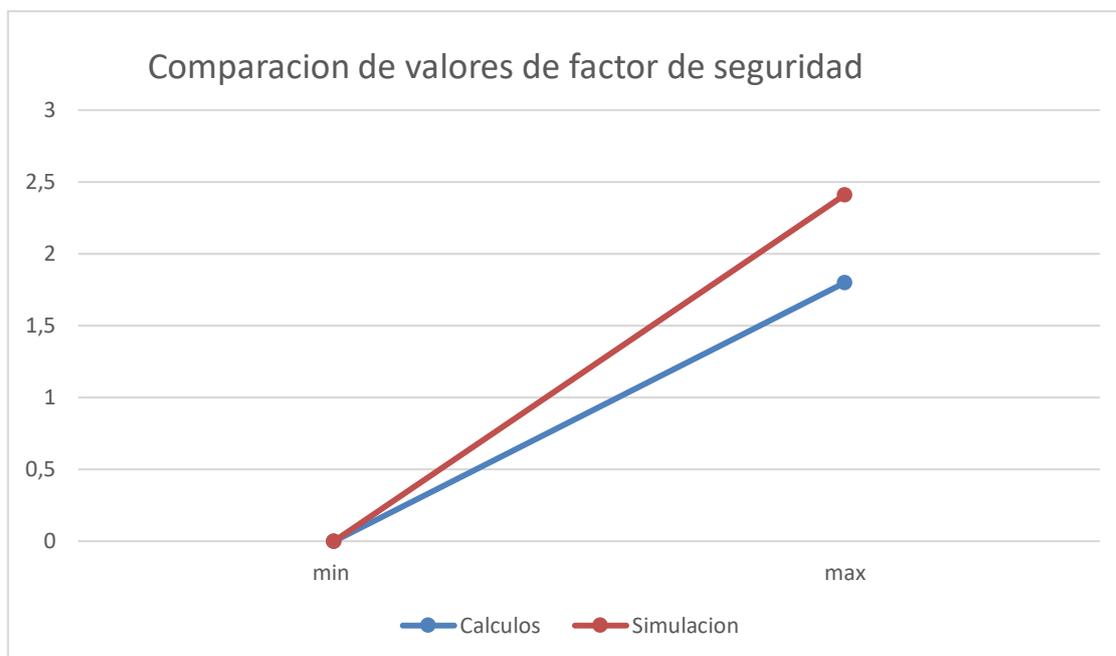


Figura 51. Tabla comparativa de resultados del factor de seguridad SAE 4340

Acero SAE 1045

Se realizan los mismos cálculos y simulación con los datos del material SAE 1045 que se muestran en la tabla 47.

Tabla 47
Datos para cálculos y simulación

Material		Piñón Cremallera	
		Dientes	20 30
acero	SAE 1045	m=	2
	Sut= 637 MPa	Ka=	1
	S= 313 MPa	Km=	1.3
	E= 205 GPa	Kv=	0,768
	Poisson= 0,33	B=	21 mm

Esfuerzo de flexión

σ_p = esfuerzo de flexión en el piñón

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

$$\sigma_p = \frac{S_{ut}}{3} = \frac{637}{3} \text{ Mpa} \qquad \sigma_p = 212,3 \text{ N}$$

$$\sigma = \frac{K_v * W_t}{B * m * Y}$$

$$W_t = \sigma_p * B * m * Y$$

$$W_t = 212,33 * 21 * 2 * 0,314$$

$$W_t = 2800,52 \text{ N}$$

$$\sigma = \frac{W_t}{K_v * B * m * Y}$$

$$\sigma_{max} = \frac{2800,52}{0,769}$$

$$\sigma_{max} = 3641,42 \text{ psi}$$

$$\sigma_{max} = 25,10 \text{ Mpa}$$

$$\text{Esfuerzo a fatiga permisible} = \frac{S_t}{S_f} \frac{Y_N}{K_t * K_r}$$

$$S_f = \frac{S_t}{\sigma_{perm}} \frac{Y_N}{K_t * K_r}$$

$$S_f = \frac{637}{212,3} \left(\frac{0,9}{1 * 1,5} \right)$$

$$S_f = 1,8$$

Deformación SAE 1045

En la figura 52 se puede observar los resultados de deformación que se produce en la zona de contacto de los dientes al aplicar el momento de 266 N m. Esta deformación llega hasta 0.0432 mm, y es levemente menor que el valor de deformación de la simulación del material SAE 4340 que se observa en la figura 47, esto debido al mayor módulo de Young del SAE 1045.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

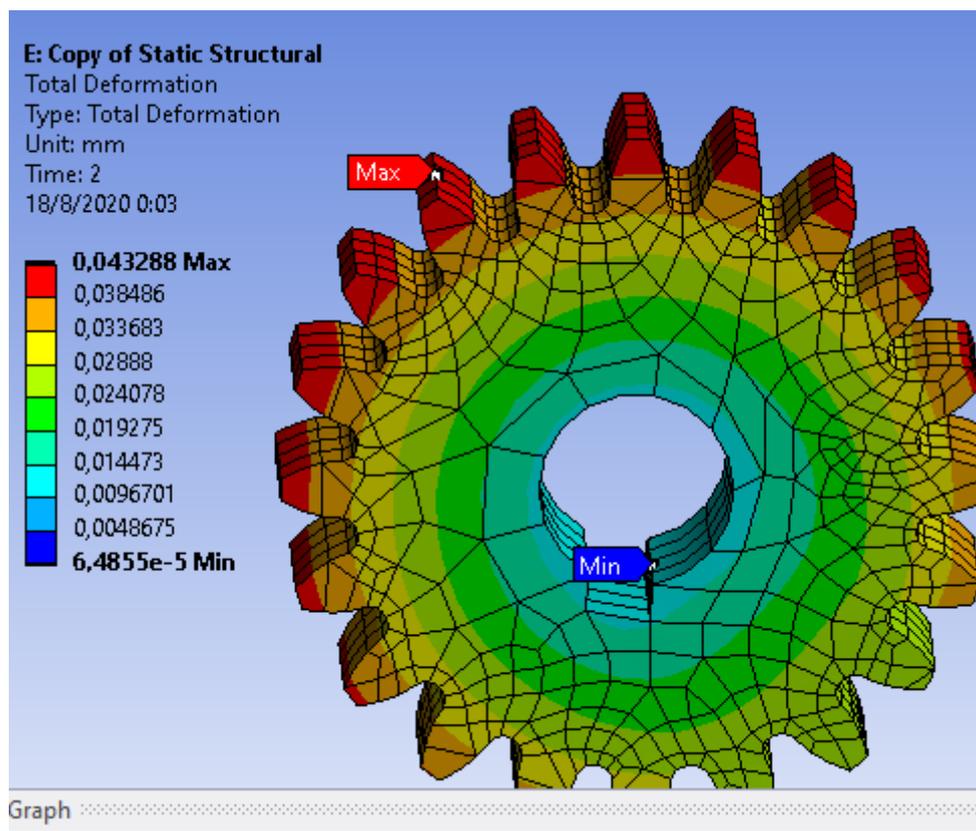


Figura 52. Deformación total SAE 1045

Esfuerzo Von Misses SAE 1045

En la siguiente figura 53 se puede observar que la parte del engrane que sufre mayor esfuerzo es el diente, en la cara donde tiene contacto con los dientes de la cremallera, en la zona de la involuta y en la base del diente o flancos, el máximo esfuerzo es de 405,38 MPa que está fuera del valor de resistencia del material que es de 637 MPa, y el promedio es de 26,9 MPa como se ve en la figura 54, este promedio excede el esfuerzo máximo permisible de 25,10 MPa calculado anteriormente con la ecuación 47. Por lo que el material SAE 1045 sufre esfuerzo excesivo al realizar el trabajo y podría fallar tempranamente.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

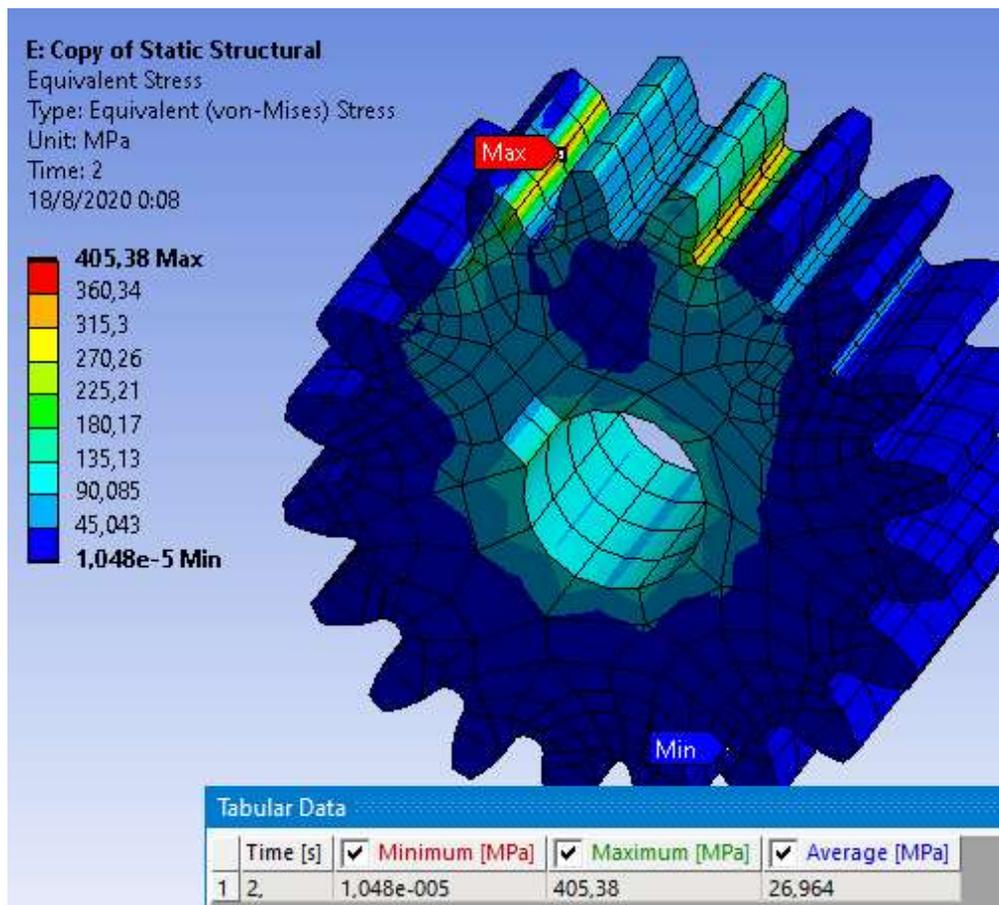


Figura 53. Esfuerzo de Von Misses SAE 1045

Factor de seguridad SAE 1045

La figura 54 se puede ver los valores del factor de seguridad es de 0.71, este valor es inferior a los valores de las tablas de factor de seguridad en engranes que dice que debe ser mayor a 1,3, este valor obtenido en la simulación se compara con el valor obtenido por los cálculos. Pero ya sabiendo que el factor de seguridad es menor al establecido en libros y catálogos para los mecanismos piñón cremallera se puede decir el material SAE 1045 no satisface los requerimientos de diseño y la selección del material SAE 4340 es correcta, la simulación y diseño del engrane.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

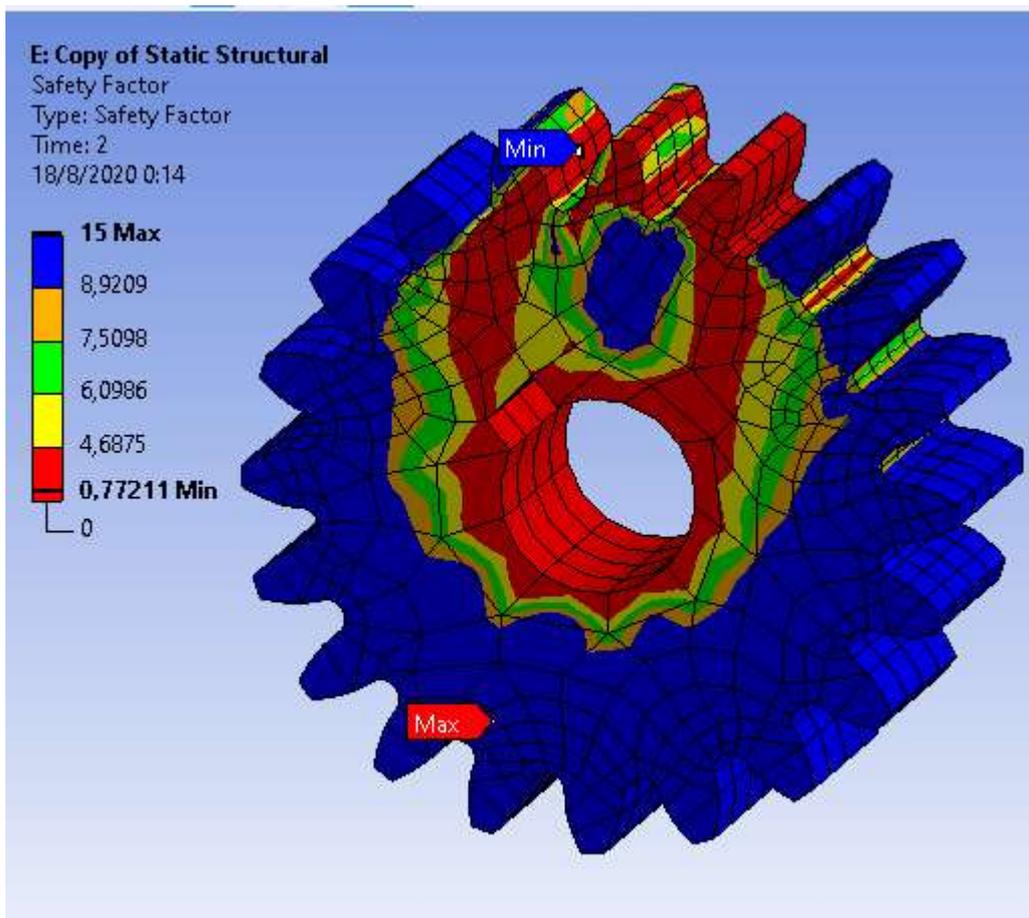


Figura 54. Factor de seguridad SAE 1045

Comparación de resultado de simulación y cálculos (SAE 1045)

En la figura 55 y 56 se tiene las tablas comparativas entre la simulación y los cálculos aplicando las fórmulas de engranes y cálculos de esfuerzo y factor de seguridad.

El esfuerzo obtenido en la simulación es 1,8 MPa mayor que el obtenido mediante los cálculos por lo que el material podría fallar y esta diferencia también influye directamente en el factor de seguridad que no cumple el mínimo establecido para engranajes.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

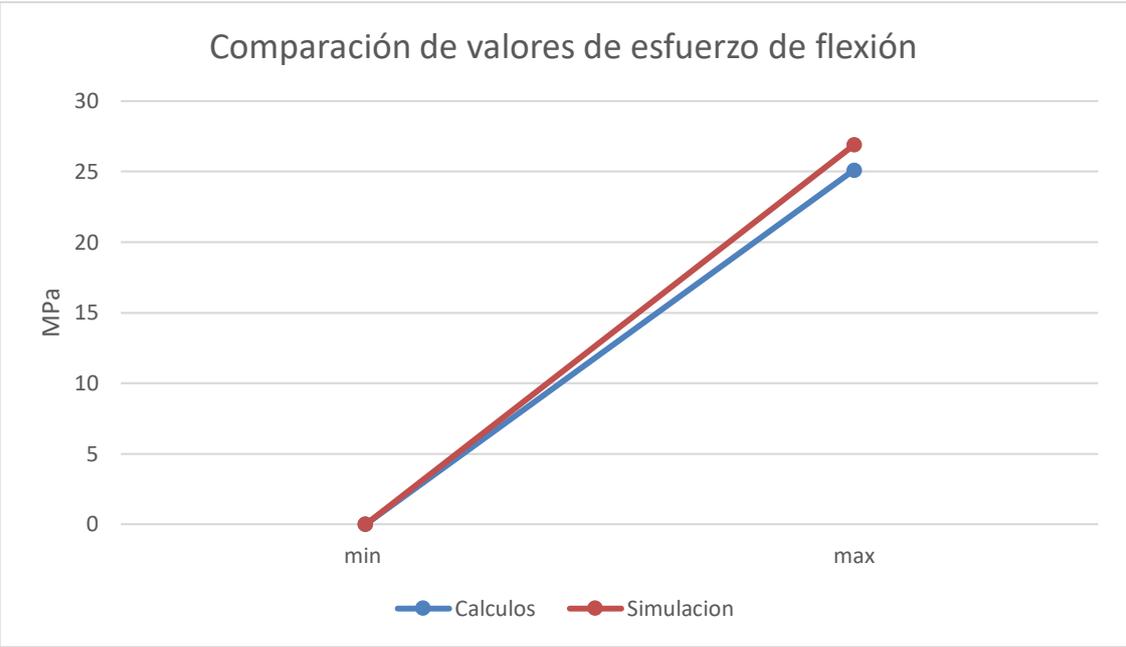


Figura 55. Tabla comparativa de resultados de cálculos y simulación SAE 1045

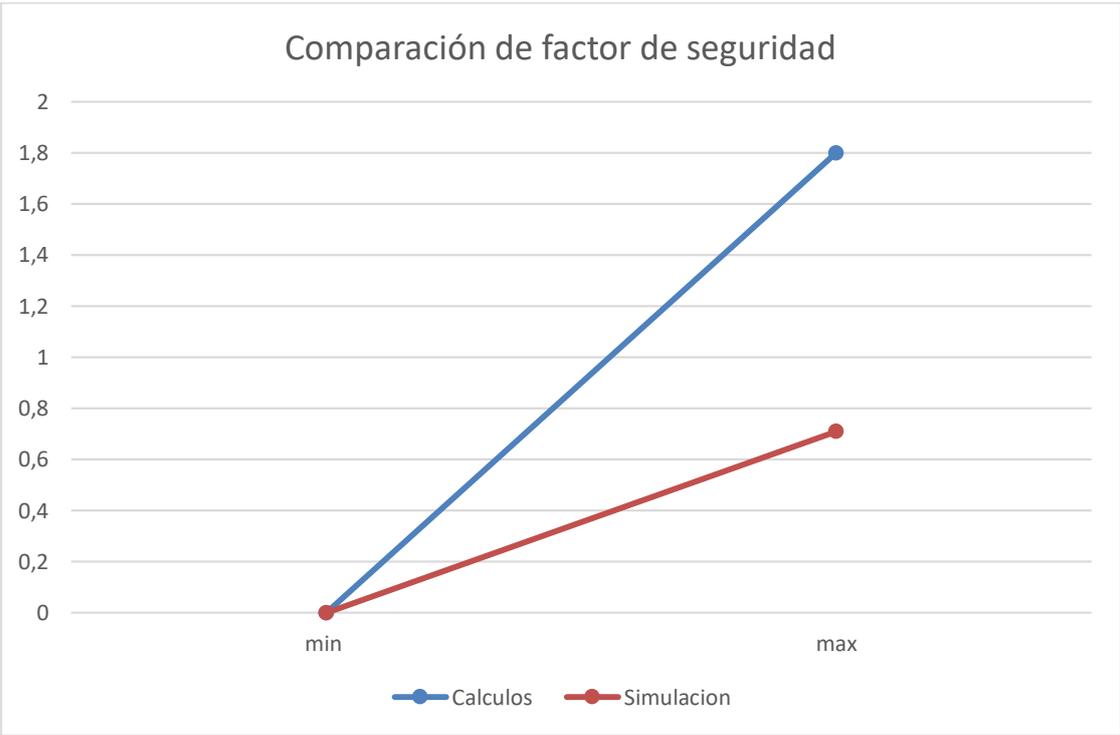


Figura 56. Tabla comparativa de resultados del factor de seguridad SAE 1045

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Discusión de resultados

Este estudio presenta la evaluación de ciclo de vida LCA como un complemento a la selección de materiales para piezas automotrices y para estudios similares de elección con metodología multicriterio con los que se comparan los resultados, y a su vez complementa a estudios de simulación de mecanismos piñón cremallera muy utilizado en distintos tipos de automóviles y otros sistemas mecánicos de transmisión de fuerza por engranajes. Este trabajo toma en cuenta el impacto ambiental de los elementos que componen un auto desde su proceso de extracción hasta el fin de su vida, con el fin de la implementación de una metodología de selección con materiales sustentables para la industria automotriz que es importante conjugar con la selección multicriterio para lograr una elección adecuada y así ser una guía para el ecodiseño en el medio ecuatoriano.

El estudio LCA que se realiza es decisivo en la elección del material para este mecanismo, ya que sin tener en cuenta el ranking ambiental el acero elegido es el SAE 1045 un acero medio carbono con buenas propiedades mecánicas, sin embargo después de incluir el ranking ambiental que tiene como criterios de evaluación: la huella de CO₂ y el consumo energético a lo largo de 15 años de vida del producto, la elección cambia por el SAE 4340 que es un acero de baja aleación al cromo, molibdeno, con bonificación, que presenta excelentes valores altos de resistencia, dureza y elongación adecuados para la aplicación reduciendo peso y bajando costos, pero además es un material menos contaminante durante su ciclo de vida como se evidencio en el estudio en Ecoaudit del software CES Edupack, es así que se evidencia la importancia del tomar en consideración el LCA para el diseño desde el inicio del proceso.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Es de esta manera que el acero seleccionado entre los candidatos es el SAE 4340, este material es el primero en el ranking ambiental y en el ranking Topsis, así como el segundo lugar en el ranking Copras, ocupa el quinto lugar en el ranking Vikor sin embargo por su posición en los otros tres métodos es el material elegido. Esta elección es similar a la realizada por (Vaca et al., 2020) en la elección de un material para la caja de cambios de una camioneta Dmax, en el que se aplica la metodología multicriterio aplicando 4 métodos que son: Copras, Vikor, Promethee y Topsis a 5 materiales entre aceros, aluminio y aleaciones, eligiendo el acero AISI/SAE 4140 como el mejor material, un acero aleado para construcción de maquinaria con una alta resistencia especialmente en medidas pequeñas, bajo norma se suministra templado y bonificado por lo que no es necesario tratamiento posterior. (Suministros Tecnicos S.A, 2017).

Vaca et al., (2020) aplica un torque de 240 Nm donde se aprecia en diferentes tiempos la deformación que se produce en la zona del contacto entre dientes y llega hasta 0.03mm, deformación casi imperceptible, pero con el tiempo hace que tienda a desgastarse la superficie. Se puede determinar que el material AISI 4140 se comporta excelentemente ante la deformación, al igual que en este estudio donde se aplica un torque de 266,2 Nm y se obtiene una deformación máxima de 0,1099 mm en los dientes del piñón que como se demostró en los cálculos es la pieza que más se ve afectada al aplicar el torque.

Los valores del método de entropía se utilizan para combinarlos con el método: Copras, Vikor y Topsis, ya que el concepto de entropía utiliza los grados de evaluación para medir los pesos correspondientes en la matriz de evaluación. Cuanto mayor es el grado de variación, más información posee el criterio y mayor es el peso del criterio. De esta forma se obtendrán pesos más objetivos (Ma et al., 2018a). Por tal razón es el método de ponderación más utilizado para el desarrollo de los MCDM en la selección de materiales como el estudio realizado por (Chérrez

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

y Martínez Gómez et al., (2018) en la selección de un material para los disco de frenos teniendo como universo, 5 materiales y 10 criterios de evaluación que con el método de entropía se obtendrán los respectivos pesos para combinar con los métodos: Copras, Vikor, Electre, Moora y Aras para obtener 5 ranking, compararlos y elegir el material más apropiado para el disco de frenos, ASTM 536, se consideran criterios de diseño técnicos tradicionales mas no ambientales.

La selección mediante índices es importante ya que ayuda a reducir y establecer los mejores materiales para una determinada aplicación como se realizo con el CES Edupack al lograr reducir las opciones de mas 100 opciones a 6 metales aplicables para el piñon.cremallera como se puede ver el la figura 42 y 43. En un estudio sobre la estructura lateral autoportante para vehiculos livianos, Salazar-Loor et al., (2019) utiliza los métodos multicriterio para la elección de un material que satisfaga las exigencias de la estructura, enfocándose en minimizar el peso y costo del elemento evaluando 5 propiedades entre 4 materiales, para lo cual utiliza el software CES Edupack que tiene una biblioteca amplia, se reduce las opciones mediante las herramientas de limite, lo que coincide con lo realizado en el presente trabajo, pero este trabajo va mas allá al utilizar la herramienta EcoAudit para realizar un análisis de ciclo de vida.

En la tabla 30 se tienen los valores del estudio comparativo de emisiones de CO₂ de y consumo de energía en el ciclo de vida de cada material, donde se observa que el acero seleccionado es el que valores más bajos presenta, para el CO₂ las emisiones son de 43,9 kg y el consumo energético es de 641 MJ a lo largo de 15 años, para obtener los valores se utilizó un software EcoAudit del CES, un estudio similar propuesto por Zhao et al., (2018a) en la elección de un material sustentable para los paneles automotrices, utilizando métodos multicriterio y considerando el LCA evalúa 5 criterios ambientales, entre los cuales están los dos tomados en este estudio, el CO₂ con un valor de 11,76 kg y el consumo energético con un

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

valor de 135 MJ para una aleación de aluminio 5050, sin embargo estos valores no considera algunos factores de uso, como el lugar donde se va a utilizar el auto, en qué tipo de auto será montado el panel de la puerta, combustible del auto, días de uso y años de vida como en el presente estudio lo que resalta el mismo.

El modelo de simulación se genera con una densidad de malla incrementada, donde el software reconoce entre ambos engranes un total de 25591 nodos y 10790 elementos como se ve en la figura 33, el esfuerzo que se toma para el cálculo y para la simulación es el equivalente de Von Mises, ya que el esfuerzo de flexión es el único presente en el contacto entre dientes y se analiza en el software la región en contacto. El resultado generado por el software en cuanto al esfuerzo de flexión máximo de Von Mises en este estudio es 27 MPa psi en comparación a los 38,6 MPa que se obtiene en el cálculo de la validación está dentro del rango del esfuerzo permisible del material con toda seguridad la solución casi ha convergido ya no excede los valores máximos.

El esfuerzo máximo de Von Mises máximo que se consigue en la simulación de este proyecto es de 405,38 MPa, este resultado es comparable al estudio de diseño de un mecanismo piñón cremallera que realiza Hlaing (2017) donde utilizan un piñón de 6 dientes al que se aplica una fuerza de 2610 N y una cremallera con 28 dientes y la tensión máxima de contacto que consiguen es de 944,31 MPa, utilizando un acero con esfuerzo ultimo $S_u = 950$ MPa, resistencia a la tracción $S_y = 1570$, módulo de young $E = 207$ GPa. Se puede comparar con el proyecto de Kumar (2019) donde se elige al acero 4140 para el diseño del piñón cremallera de entre 3 opciones, pero esta elección no se toma con ninguna metodología multicriterio, mucho menos considerando el ciclo de vida del material por lo que el presente estudio sirve como complemento a los estudios de simulación de materiales mediante elementos finitos.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

El factor de seguridad para falla de fatiga por flexión obtenido en la simulación $S_f = 2,41$ mientras el calculado de forma manual tiene un valor de $S_f = 1.8$, este resultado se valida en base al estudio como el diseño en ingeniería mecánica de (BUDYNAS, RICHARD G. NISBETT, 2014) donde explican que la condición teórica para la validación de engranajes es que el factor de seguridad para falla de fatiga por flexión S_f debe ser mayor a 1.25, esta condición sirve para requerimientos de aplicaciones de alta confiabilidad. Por tanto se asegura que el engranaje va a soportar y resistirá la carga y sobre carga de trabajo considerable, esto es ideal para el trabajo que desempeña el mecanismo. El factor de diseño $S_f = 1.8$ obtenido mediante cálculos y comparando con el $S_f = 2,41$ de la simulación, se debe principalmente a que en el ejercicio se considera la aplicación de un tratamiento térmico para aumentar las propiedades mecánicas del material. En definitiva se justifica que la simulación está bien realizada.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Conclusiones

Se determinó el mejor material para el mecanismo piñón – cremallera aplicando una metodología híbrida de selección que combina criterios ambientales evaluados con el análisis de ciclo de vida (LCA) y criterios técnicos ponderados mediante métodos de decisión multicriterio (MCDM) , este material resultante de aplicar esta metodología combinada es un material sostenible, al ser el que menor impacto ambiental y a su vez cumple satisfactoriamente con las exigencia de técnicas y económicas de diseño requeridas.

Se determinó que el método de entropía (IEM) con la metodología TOPSIS, después de realizar un análisis comparativo y estadístico entre los mismos son la combinación y solución ideal para el caso de estudio ya que el método TOPSIS se caracteriza por su racionalidad y transparencia de procedimiento, además de ser de fácil ejecución permite incluir los factores de costos y beneficio fácilmente en la operación y es muy aplicado en casos de análisis cualitativos y cuantitativos. Y el IEM es un método que tiene cierta ventaja sobre otros métodos que tienden a ser subjetivos, al hacer una interpretación más completa de los resultados y ser una metodología más objetiva y precisa para establecer los pesos de cada criterio y así dar fiabilidad al ranking obtenido por el método TOPSIS.

TOPSIS experimenta el menor número de reversiones de rango en comparación con los diversos métodos de MCDM como ELECTRE y varias versiones de AHP. La reversión de rango es un tema muy famoso de las técnicas MCDM que consiste en una inversión en el rango de alternativas cuando se elimina una alternativa o se agrega una nueva alternativa.(Ma et al., 2018b)

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Se seleccionó al acero AISI 4340 como el material sostenible de esta investigación, en base a los gráficos comparativos este material muestra una ventaja frente al resto de materiales de la lista, ya que los valores de CO₂ y el consumo de energía que conlleva su LCA y los criterios de costo, elongación y peso, son los más bajos entre el resto de aceros, mientras que los criterios establecidos como beneficiosos, límite elástico, resistencia a la tensión superan al del resto de materiales.

Se simuló las propiedades del material elegido para el mecanismo piñón cremallera de la barra de la dirección, mediante el uso del software Ansys estableciendo condiciones de contorno que simulen de la mejor manera el funcionamiento del mecanismo piñón – cremallera, fijando puntos de anclaje, colocando las fuerzas sobre él y eligiendo un mallado adecuado para el análisis.

Se comprobó que los valores de los esfuerzos ejercidos sobre el mecanismo no superan los valores del límite elástico y la resistencia a la tensión y el módulo de elongación están dentro del rango de valores del acero SAE 4340 elegido en esta investigación como material sustentable para la fabricación del mecanismo piñón cremallera de la barra de la dirección y trenes de engranaje en general.

La validación ambiental durante el paso del diseño conceptual evidencia que las etapas más influyentes del ciclo de vida son el suministro y uso de materiales, respectivamente, debido al consumo de recursos durante la producción y el consumo de combustible / emisiones durante la operación. En términos absolutos, el cambio a la solución ligera conduce a una reducción considerable del impacto ambiental para la mayor parte de las categorías de LCIA; Por otro lado, para ADPelements y ODP implica cargas mucho más altas, debido a la

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

absorción de energía y las emisiones al aire durante los procesos de extracción y producción de materias primas. La interpretación de los resultados ambientales es particularmente difícil debido a los efectos opuestos que implica el aligeramiento en diferentes etapas del ciclo de vida, así como en las categorías de impacto; a pesar de esto, el estudio de LCA a nivel mundial revela que los materiales compuestos se pueden adoptar con éxito para aplicaciones bajo el capó con el fin de cumplir con las expectativas de peso ligero al tiempo que se conservan los requisitos funcionales y de rendimiento en una perspectiva de sostenibilidad ecológica.

Se comprobó la utilidad de la presente investigación en la selección de un material para con el fin de fabricación nacional en un futuro cercano ya que la metodología aplicada elige no solamente un material que cumple las exigencias del diseño técnicamente sino que es un material ambientalmente amigable y menos contaminante, lo que lo hace un proyecto sustentable para su implementación, además ser replicable en muchos otros campos industriales a parte del automotriz, generaría trabajo y se adapta al plan nacional de buen vivir que busca el cambio de la matriz productiva y energética del Ecuador.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Recomendaciones

Se recomienda la utilización del método de Entropía para determinar el peso de cada criterio de selección por ser una metodología confiable que presenta menos distorsiones en los resultados que otros tipos de análisis subjetivos.

Se recomienda utilizar 3- 4 MCDM con sus criterios de evaluación bien definidos, combinarlos con los valores obtenidos por método de entropía, para obtener el ranking de cada uno de los MDCM, y al final del proceso analizar los resultados de cada ranking y comprar los mismos para realizar la mejor elección, no siempre la primera opción es la mejor para el diseño buscado el diseñador debe evaluar los resultados y tomar una decisión.

Se recomienda aplicar los métodos de toma de decisiones multicriterio combinado con el análisis de ciclo de vida en el diseño o fabricación de piezas de repuesto en el área automotriz, e implementar así una metodología de ecodiseño para obtener materiales menos perjudiciales al medioambiente y que sean sostenibles en el tiempo.

Los sistemas de engranajes tienen un sinnúmero de aplicaciones en el área industrial por lo que se recomienda ahondar en el estudio de selección de materiales con énfasis en los materiales sostenibles para sistemas de transmisión de potencia con la finalidad de implementar en el país una fábrica sistemas de transmisión o de repuestos para automóviles.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Referencias Bibliográficas

Aceros de cementación. (2010). 3009.

Agarski, B., Kljajin, M., Budak, I., Tadic, B., Vukelic, D., Bosak, M., & Hodolic, J. (2012). Application of multi-criteria assessment in evaluation of motor vehicles' environmental performances. *Tehnicki Vjesnik*, 19(2), 221–226.

Agrawal, P. L., Patel, S. S., Parmar, S. R., Automotive, T. R. W., Suryavanshi, O. D., Prasad Sathe, P., Takey, M. A., Kulkarni, N., Wani, P., Hlaing, T. Z. T., Win, H., Thein, M., Norma, L. A., Agma, A., Díaz, F., Shrinivas Mahale, R., Mahale, R., Jaiswar, M., Gupta, G., ... Analysis, S. (2017). Designing of the Rack and Pinion Gearbox for All Terrain Vehicle for the Competition Baja Sae India and Enduro Student India. *Revista de Ingeniería Mecánica*, 5(2), 612–615. <https://doi.org/10.15623/ijret.2017.0609014>

Análisis del ciclo de vida (ACV) / Life Cycle Analysis (LCA) | Andaltec. (n.d.). Retrieved June 4, 2020, from <https://www.andaltec.org/analisis-del-ciclo-de-vida-acv-life-cycle-analysis-lca/>

Aplicación, M. D. E. S., & Gutiérrez-bucheli, L. A. (2014). *PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO COMO*. February 2016. <https://doi.org/10.13140/2.1.4596.3848>

Automotive, T. R. W. (n.d.). *Caja de Dirección TAS Manual de Servicio*.

Aziz, N. A., Wahab, D. A., Ramli, R., & Azhari, C. H. (2016). Modelling and optimisation of upgradability in the design of multiple life cycle products: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 112, 282–290. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.076>

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

BUDYNAS, RICHARD G. NISBETT, K. J. (2014). Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley.

Igarss 2014, 1, 1–5. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>

Carabaño, R., Bedoya, C., & Ruíz, D. (2014). La metodología del análisis de ciclo de vida para

la evaluación del impacto ambiental en el sector de la construcción: El estado del arte. *I*

Congreso Internacional Sobre Investigación En Construcción y Tecnología

Arquitectónicas, 1987, 7. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1811.0169>

Cataluña, U. (n.d.). *Capítulo 4. Técnicas de modelado y simulación*. 42–54.

Chatterjee, P., & Chakraborty, S. (2012). Material selection using preferential ranking methods.

Materials and Design, 35, 384–393. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.027>

Ciclo de vida. (2017). *Ciclo de vida del maíz - Ciclo de vida*. 57(1), 5041.

<http://ciclodevida.net/del-maiz>

Delogu, M., Maltese, S., Del Pero, F., Zanchi, L., Pierini, M., & Bonoli, A. (2018). Challenges

for modelling and integrating environmental performances in concept design: the case of

an automotive component lightweighting. *International Journal of Sustainable*

Engineering, 11(2), 135–148. <https://doi.org/10.1080/19397038.2017.1420110>

Díaz, F. (2013). Engranajes: Historia, Fabricación y Fallas. In *Principios de Electrodeposición*.

DIN1.6566 17NiCrMo6-4 18NiCrMo5 817M17 SAE4317 Acero de endurecimiento de caja |

Fushun Special Steel Co., Ltd. - Proveedor profesional de acero especial y fabricante de

acero para herramientas. (n.d.). Retrieved June 20, 2020, from

<https://www.fushunspecialsteel.com/din1-6566-17nicrmo6-4-18nicrmo5-817m17->

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

sae4317-case-hardening-steel/

Eduardo, L., Hernandez, B., Rodríguez, Á. S. M., Rodríguez, J. L. M., Mecánica, D. I., Central, U., Abreu, M., & Fórmula, S. A. E. (2013). *Principales fallas en las transmisiones por engranajes*. 32(4), 62–67.

El acero y la sustentabilidad: nuevas ideas, mejores soluciones. (n.d.). Retrieved June 4, 2020, from <https://www.hatch.com/es-CL/About-Us/Publications/Blogs/2017/08/Steel-and-sustainability-new-ideas-better-solutions>

Fernandez, A. I., Martnez, M., Segarra, M., Martorell, I., & Cabeza, L. F. (2010). Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(10), 1723–1729. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.05.035>

Fontana, M., & Muñuzuri, J. (2015). *Equation Chapter 1 Section 1 Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Industrial Métodos de decisión multicriterio AHP y PROMETHEE aplicados a la elección de un dispositivo móvil*. 65. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5618/fichero/ProyectoFinal2.pdf>

General Motors Company. (2013). *Technical Data Sheet Chevrolet Aveo*. 6–7.

Giudice, F., La Rosa, G., & Risitano, A. (2005). Materials selection in the Life-Cycle Design process: A method to integrate mechanical and environmental performances in optimal choice. *Materials and Design*, 26(1), 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.04.006>

Guajala Agila, H., & Zambrano Solís, M. (2016). *Departamento de ciencias de la tierra y la construcción*. 103.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Hlaing, T. Z. T., Win, H., & Thein, M. (2017). *Design and Analysis of Steering Gear and Intermediate Shaft for Manual Rack and Pinion Steering System*. 7(12), 861–882.

Jahan, A., Mustapha, F., Sapuan, S. M., Ismail, M. Y., & Bahraminasab, M. (2012). A framework for weighting of criteria in ranking stage of material selection process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(1–4), 411–420. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3366-7>

Kulkarni, N., Wani, P., Shinde, D., Mayekar, V., Jain, N., Borse, P., Hlaing, T. Z. T., Win, H., Thein, M., Shrinivas Mahale, R., Mahale, R., Jaiswar, M., Gupta, G., & Kumar, A. (2017). Design and Analysis of a steering Rack of an ATV for different materials under static loading conditions. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 7(12), 654–658. <https://www.researchgate.net/publication/323225849>

Loganathan, A., & Mani, I. (2018). A fuzzy based hybrid multi criteria decision making methodology for phase change material selection in electronics cooling system. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 2943–2950. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.11.005>

Ma, F., Zhao, Y., Pu, Y., & Li, J. (2018a). A comprehensive multi-criteria decision making model for sustainable material selection considering life cycle assessment method. *IEEE Access*, 6, 58338–58354. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2875038>

Ma, F., Zhao, Y., Pu, Y., & Li, J. (2018b). A comprehensive multi-criteria decision making model for sustainable material selection considering life cycle assessment method. *IEEE Access*, 6, 58338–58354. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2875038>

Madias, J. (2017). *Disminución de emisiones de CO 2 de los altos hornos*. February.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Marks, J., Lubetsky, J., Steiner, B. A., Faerden, T., Marks, J., Tranell, G., & Lubetsky, J. S. (2006). CAPÍTULO 4. Emisiones de la industria de los metales. *Directrices Del IPPC de 2006 Para Los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero*, 94.

Martínez Gómez, J., Chérrez Troya, M., Llanes Cedeño, E. A., & Peralta Zurita, D. (2018). Métodos multicriterio aplicados en la selección de un material para discos de freno. *Ingenius*, 20, 83–95. <https://doi.org/10.17163/ings.n20.2018.08>

Mendieta, S. C. (2017). *Estimación del consumo energético y emisiones de CO₂ en el ciclo de vida de toallas de papel y secadores eléctricos*.

Miranda, M. F. (2014). Universidad Internacional SEK. In *Panorama*.

Pasos en el proceso moderno de fabricación de acero. (n.d.). Retrieved June 8, 2020, from <https://www.thebalance.com/steel-production-2340173>

Patel, A., Bhatt, N., & Rawade, M. B. (2019). Design methodology and manufacturing of rack and pinion for all terrain vehicle. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*, 8(6), 422–425.

Power Steering Calc | Cylinder (Engine) | Volume. (n.d.). Retrieved June 26, 2020, from <https://es.scribd.com/document/321652059/Power-Steering-Calc>

Rack & Pinion In this presentation. (n.d.).

Rieznik, N., & Hernández, A. (2005). Análisis del ciclo de vida. *Capítulo 3. Metodología Del Análisis Del Ciclo De Vida*, 1–14. https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250504/2013/Analisis del Ciclo de Vida.pdf

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Risk, O. (n.d.). *The Business Case for Product Sustainability » Life Cycle Assessment helps us to fully understand. TATA STEEL.*

Rue Colonel Bourg, Ihobe, & López Hualda, A. (2011). Guía Técnica para la Medición, Estimación y Cálculo de las Emisiones al Aire de los sectores agroalimentario y ganadero • *International Stainless Steel Forum (ISSF)*, 1–11.
http://www.ingurumena.ejgv.euskadi.net/r49-6172/es/contenidos/manual/eptr/es_guia/adjuntos/agroalimentario.pdf

Salazar-Loor, R., Martínez-Gómez, J., Rocha-Hoyos, J., & Llanes-Cedeño, E. A. (2019). Métodos Multicriterio aplicados a la parte lateral de una estructura autoportante para vehículos livianos. *CienciAmérica*, 8(2), 59. <https://doi.org/10.33210/ca.v8i2.172>

Shinde, D., Mayekar, V., Jain, N., Borse, P., Hlaing, T. Z. T., Win, H., Thein, M., Shrinivas Mahale, R., Mahale, R., Jaiswar, M., Gupta, G., & Kumar, A. (2017). Weight Optimization of Steering Rack and Pinion By Using Different Metal for Rack With New Idea of Cold Shrink Fit. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 7(12), 861–882. <https://www.researchgate.net/publication/323225849>

Suministros Tecnicos S.A, S. (2017). *AISI 4140 Steel*. 3. <http://www.matweb.com/>

TRANSMISIONES POR CREMALLERA PIÑÓN Cremalleras Introducción. (n.d.).
<http://www.mecapedia.uji.es/catalogos/engranaje/spitkoom.1.pdf>

Ungureanu, C. A., Das, S., & Jawahir, I. S. (2004). Therapeutics of the future. *Pharmaceutical Journal*, 273(7310), 136.

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Unido, R. (2010). *Acero para cementar*. 1–2.

Vaca, C., Martínez, J., & Leguísamo, J. (2020). selección de materiales mediante uso de multicriterio aplicado a un engranaje helicoidal de la caja de cambios de Dmax 3.0. *CienciAmérica*, 9(1), 34. <https://doi.org/10.33210/ca.v9i1.171>

Velasco Sánchez, E., Ángel, M., Meyer, O., & Lozano, M. S. (n.d.). *EL SISTEMA DE DIRECCIÓN*.

Yousefi, A., & Hadi-Vencheh, A. (2010). An integrated group decision making model and its evaluation by DEA for automobile industry. *Expert Systems with Applications*, 37(12), 8543–8556. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.05.021>

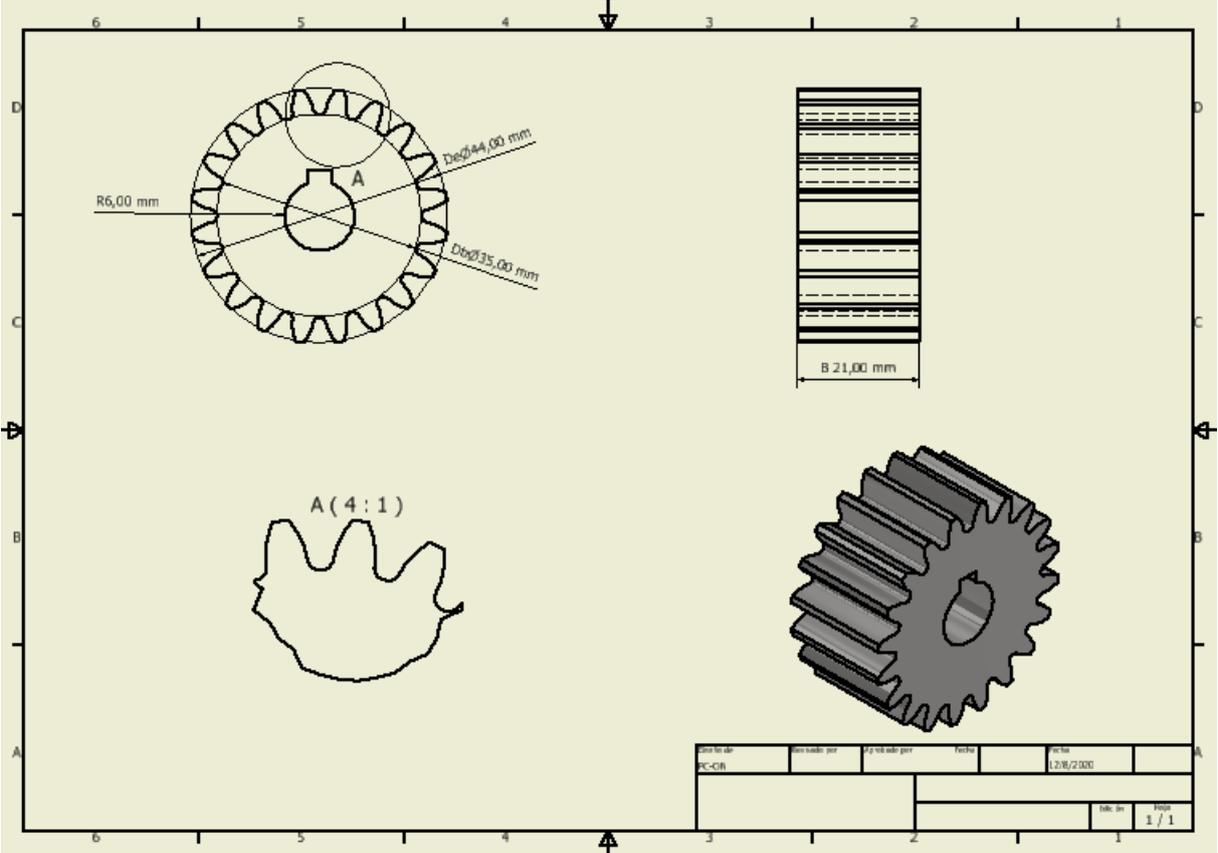
Zero Turn Radius Report - Team Panache (1). (n.d.). Retrieved June 26, 2020, from <https://www.slideshare.net/SiddheshOzarkar/zero-turn-radius-report-team-panache-1>

Zerominimum turning radius of a tractor. (n.d.). Retrieved June 26, 2020, from <https://www.slideshare.net/ijreteditor/zerominimum-turning-radius-of-a-tractor>

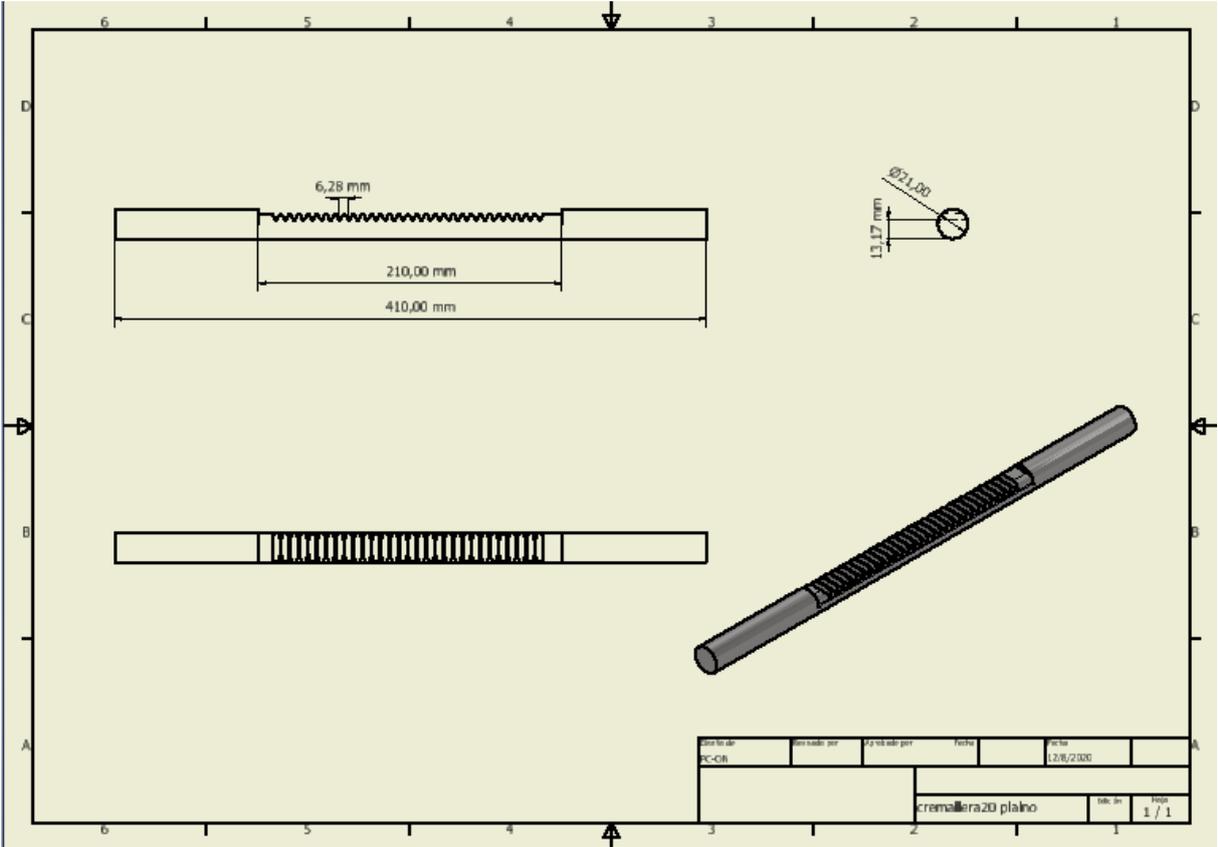
Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Anexos

Anexo A

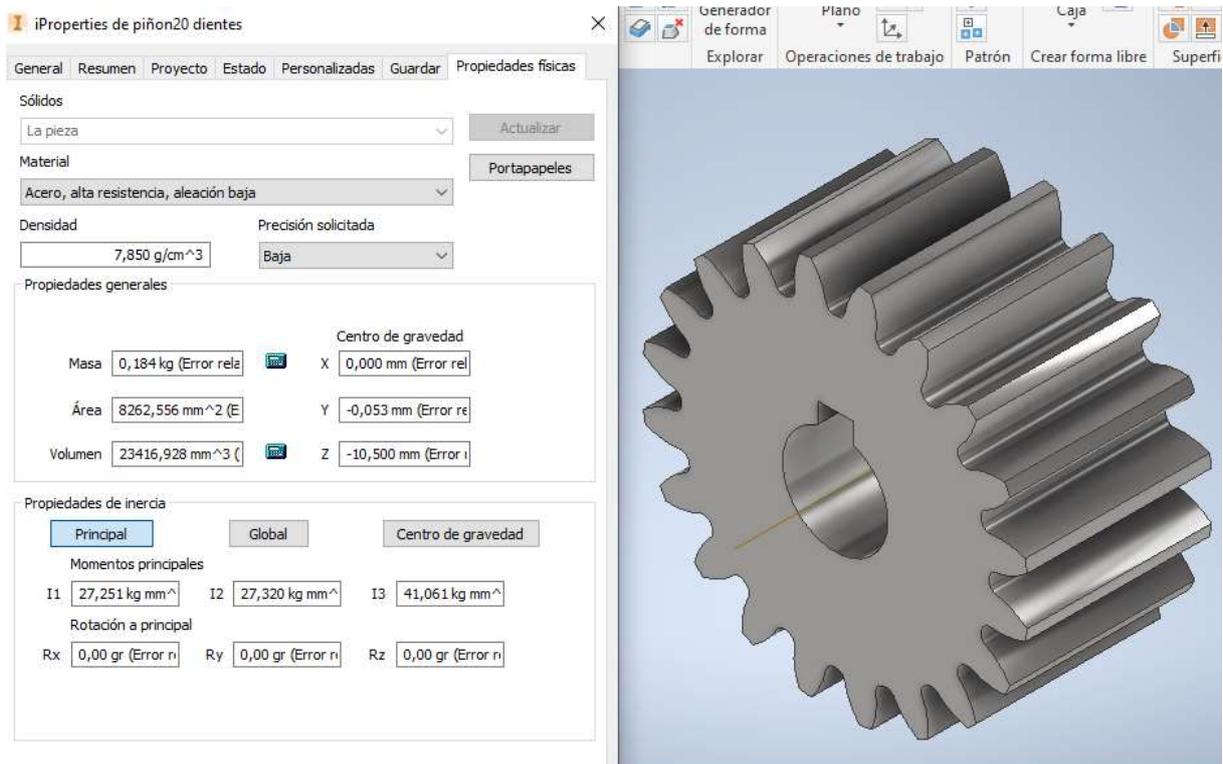
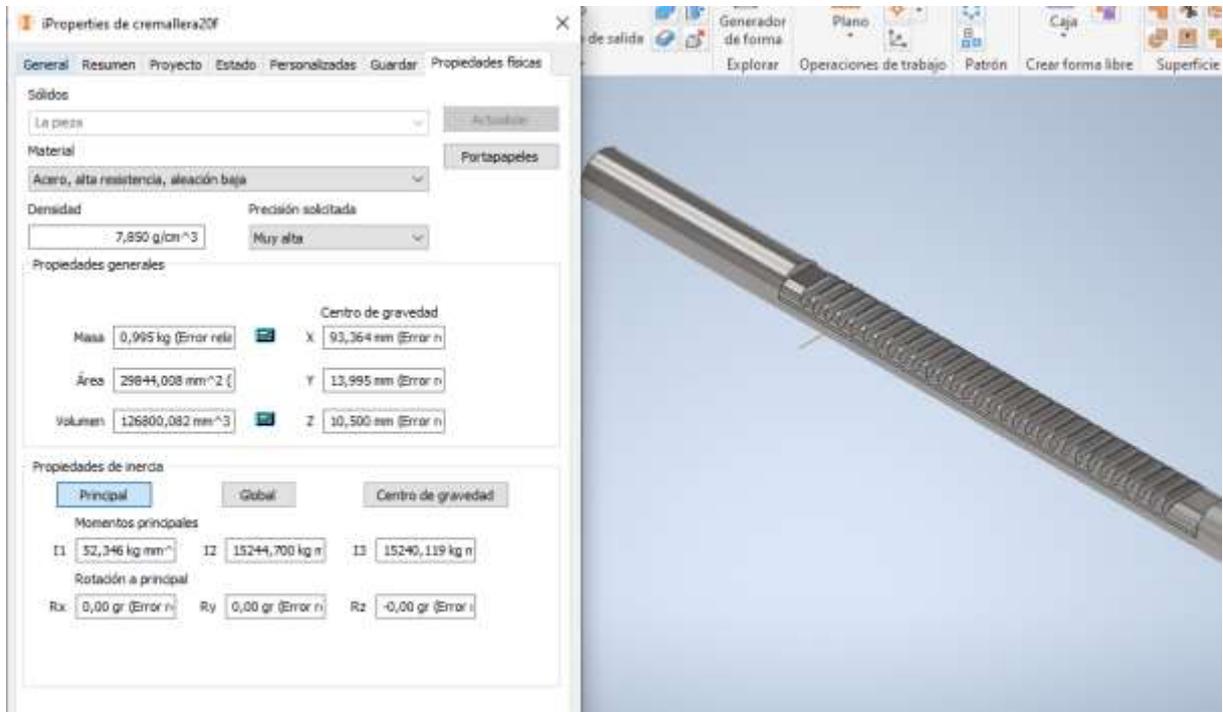


Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).



Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Anexo B



Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Anexo C

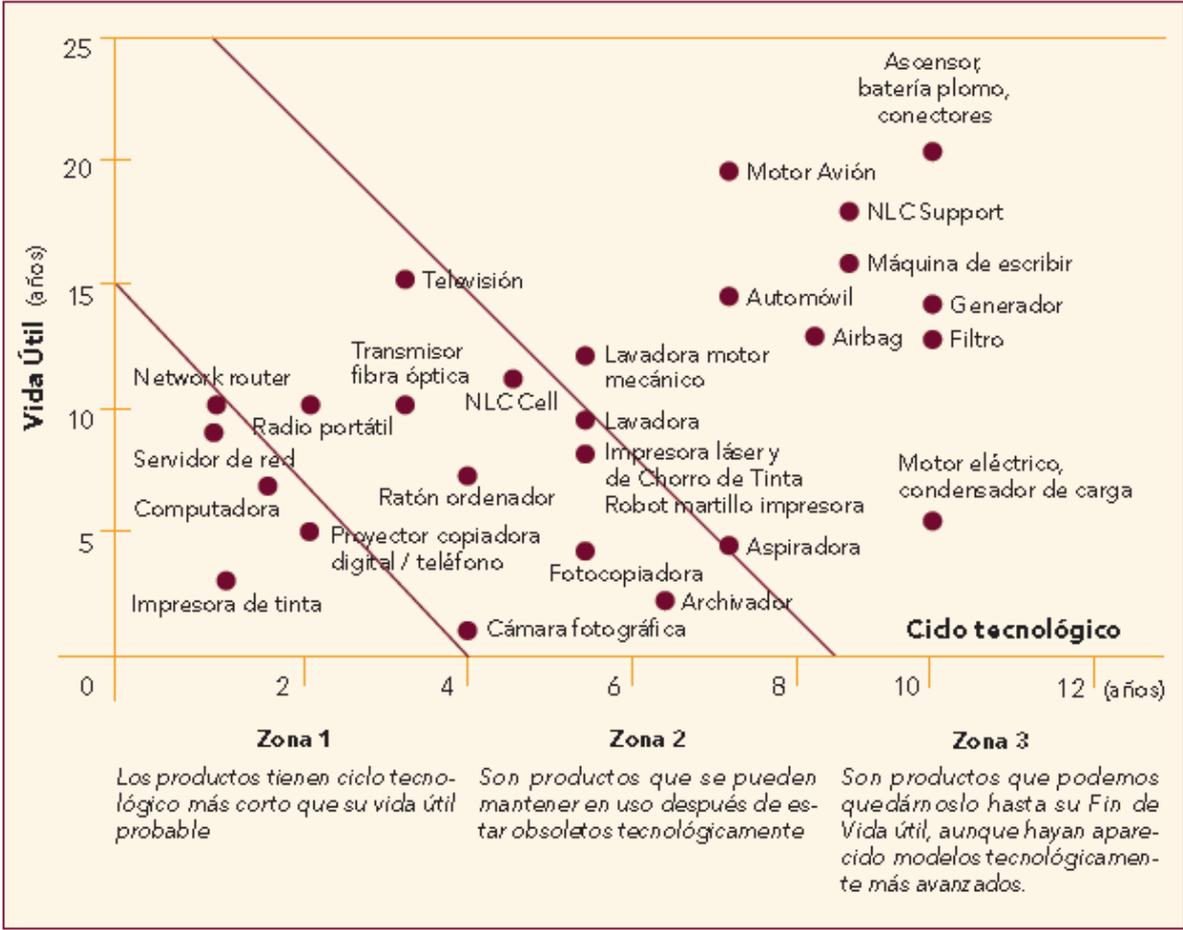


Figura 2.3. Comparación de la vida útil y el ciclo tecnológico de distintos productos. Fuente: ELDA (A New Approach to End of Life Design Advisor).

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Anexo D

www.sumaind.ec

Acero al carbono para maquinaria ACEROS

► Cód.: 760 ≅ C45 ≅ AISI 1045 

Información general

Acero al carbono sin alear de esmerada manufactura, con buena tenacidad. Características en su alta uniformidad y rendimiento. Puede utilizarse en condición de suministro o con tratamiento térmico de temple y revenido. Aplicable a partes relativamente simples de máquinas. Dureza de suministro aproximada: 200 HB.

Análisis típico %	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
C45	0.42 - 0.50	≤ 0.40	0.50 - 0.80	0.045	0.045	≤ 0.40	≤ 0.10
AISI 1045	0.43 - 0.50	0.15 - 0.35	0.60 - 0.90	0.030	0.050		
Normas equivalentes	AISI (1045), SAE (C 1045), W.Nr(1.1820), DIN (Ck45)						
Código de color	Rojo / Plomo						

Propiedades mecánicas

Tratamiento térmico

<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Resistencia a la tracción</td> <td style="text-align: center;">65 kg/mm²</td> </tr> <tr> <td>Esfuerzo de cedencia</td> <td style="text-align: center;">32 kg/mm²</td> </tr> <tr> <td>Elongación, A5</td> <td style="text-align: center;">min 10%</td> </tr> <tr> <td>Reducción de área</td> <td style="text-align: center;">40 %</td> </tr> <tr> <td>Dureza</td> <td style="text-align: center;">220 - 235</td> </tr> </table>	Resistencia a la tracción	65 kg/mm ²	Esfuerzo de cedencia	32 kg/mm ²	Elongación, A5	min 10%	Reducción de área	40 %	Dureza	220 - 235	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>TIPO</th> <th>°C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Forjado</td> <td style="text-align: center;">800 - 1050</td> </tr> <tr> <td>Normalizado</td> <td style="text-align: center;">830 - 850</td> </tr> <tr> <td>Temple (agua)</td> <td style="text-align: center;">770 - 810</td> </tr> <tr> <td>Temple (aceite)</td> <td style="text-align: center;">790 - 830</td> </tr> <tr> <td>Revenido (herramientas de corte)</td> <td style="text-align: center;">100 - 300</td> </tr> <tr> <td>Revenido de bonificación</td> <td style="text-align: center;">550 - 650</td> </tr> </tbody> </table>	TIPO	°C	Forjado	800 - 1050	Normalizado	830 - 850	Temple (agua)	770 - 810	Temple (aceite)	790 - 830	Revenido (herramientas de corte)	100 - 300	Revenido de bonificación	550 - 650
Resistencia a la tracción	65 kg/mm ²																								
Esfuerzo de cedencia	32 kg/mm ²																								
Elongación, A5	min 10%																								
Reducción de área	40 %																								
Dureza	220 - 235																								
TIPO	°C																								
Forjado	800 - 1050																								
Normalizado	830 - 850																								
Temple (agua)	770 - 810																								
Temple (aceite)	790 - 830																								
Revenido (herramientas de corte)	100 - 300																								
Revenido de bonificación	550 - 650																								

Aplicaciones

Componentes sencillos, como por ejemplo:

- Pernos
- Chavetas
- Piezas de mediana resistencia para aplicación automotriz
- Ejes

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Acero al carbono para maquinaria

► Cód.: 705 \cong 34 CrNiMo6 \cong AISI 4340 \cong AISI 4337



Información general

705 es un acero al molibdeno más cromo y níquel. El molibdeno tiene una solubilidad limitada y es un buen formador de carburos. Ejerce un fuerte efecto sobre la templabilidad y de manera semejante al cromo, aumenta la dureza y resistencia a alta temperatura de los aceros. Menos susceptibles al fragilizado debido al revenido, que los demás aceros aleados para maquinaria.

Al combinarse con níquel y cromo soporta altas exigencias de resistencia y tenacidad en secciones grandes. Su contenido de níquel le da más templabilidad, lo mismo que la resistencia en caliente.

705 combina alta resistencia mecánica (la mayor del mercado) con buena tenacidad. Este acero en forma standard es suministrado bonificado, por lo que no se requeriría luego un tratamiento térmico, sin embargo, si se desea mejores propiedades, puede ser templado al aceite. Suceptible de temple por inducción y también puede someterse a tratamiento de nitrurado.

Análisis típico %	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	V
34 CrNiMo6	0,30 - 0,38	\leq 0,30	0,50 - 0,80	0,025	0,025	1,30 - 1,70	1,30 - 1,70	0,15 - 0,30
AISI 4337	0,35 - 0,40	0,20 - 0,35	0,60 - 0,80	0,04	0,04	1,65 - 2,00	0,70 - 0,90	0,20 - 0,30
AISI 4340	0,38 - 0,43	0,15 - 0,35	0,60 - 0,80	0,03	0,04	1,65 - 2,00	0,70 - 0,90	0,20 - 0,30
Código de color	Dorado / Azul							
Equivalencias	AISI / SAE (4337 - 4340) Din (34CrNiMo6)		W.Nr (1.6582) JIS (SNCM1)		AFNOR (35NCD6)			

Aplicaciones

1.-Partes de gran resistencia para la industria automotriz, como:

- Ejes.
- Cardanes.
- Cigüeñales.
- Ejes de leva Tornillería de alta resistencia.

2.-Partes para la construcción de maquinaria de trabajo pesado como:

- Árbol para trituradoras.
- Ejes de transmisión de grandes dimensiones.
- Engranajes de temple por llama, inducción o nitruración.
- Barras de torsión.
- Mandriles.
- Portaherramientas.

3.-Aplicaciones donde se requiere resistencia a la fatiga, como:

- En la construcción de equipo pesado para camiones, aviones, equipo militar, etc.

Propiedades mecánicas

En condición de suministro

Resistencia a la tracción	90 - 110 kg/mm ²
Esfuerzo de cedencia	70 kg/mm ²
Elongación, A5	min 12 %
Reducción de área, Z	min 45 %
Resistencia al impacto, KU	aprox. 20 J
Dureza	270 - 330 HB

Tratamiento térmico

Recocido/blando

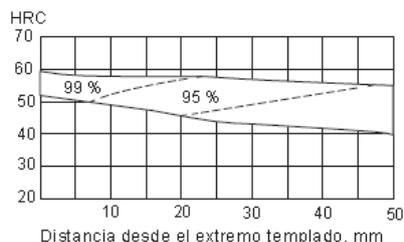
(650 - 700 °C): Mantener a la temperatura por 2 horas. Enfriar en el horno con una velocidad de 15 °C/h hasta los 600 °C y luego libremente al aire.

Alivio de tensiones

(450 - 650 °C): El acero templado tenaz deberá ser calentado hasta aproximadamente 50 °C por debajo de la temperatura usada para el revenido (como standard el 705 es suministrado revenido a 600 °C). Mantenerlo a esta temperatura durante 1/2 a 2 horas. Enfriar en el horno hasta los 450 °C y luego libremente al aire.

Temple

(830 - 850 °C), Con enfriamiento en aceite: El mantenimiento del tiempo en minutos cuando la superficie ha alcanzado la temperatura de temple es 0.7x espesor o diámetro en milímetros. Interrumpir el enfriamiento a los 125 °C y luego revenir inmediatamente.



Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

Aceros bonificados para maquinaria

► Cód.: 709 \cong 42 CrMo4 \cong AISI 4140



Información general

709 es un acero aleado para construcción de maquinaria, que posee una alta resistencia especialmente en medidas pequeñas y medianas. Como norma, el 709 es suministrado templado y revenido (temple tenaz bonificado), por lo que no se requeriría un tratamiento térmico posterior, a no ser que así lo exija la aplicación y en ese caso, se templaría en aceite para obtener propiedades mecánicas más elevadas.

709 es apropiado para templarse por flama e inducción y susceptible de nitrurar.

Análisis típico %	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
42CrMo4	0,38 - 0,45	< 0,30	0,60 - 0,90	0,025	0,025	0,90 - 1,20	0,15 - 0,30
AISI 4140	0,38 - 0,43	0,15 - 0,35	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,80 - 1,10	0,15 - 0,25
Código de color	Dorado / Verde						
Equivalencias	AISI / SAE (4140) Din (42CrMo4)		W.Nr (1.7225) JIS (SCM4)		AFNOR (42CD4)		

Aplicaciones

- 1.- Industria Automotriz
Ejes, bielas, árboles de transmisión, cigüeñales, etc.
- 2.- Maquinaria
Engranajes de temple por llama, inducción o nitruración, partes de bombas, ejes de reductores, árboles de turbinas a vapor, tornillería de alta resistencia.
- 3.- Industria petrolera
Taladros, brocas, barrenos, cuerpos de escariadores, vástagos de pistón.

Propiedades mecánicas

En condición de suministro

Resistencia a la tracción	90 - 105 kg/mm ²
Esfuerzo de cedencia	70 kg/mm ²
Elongación, A5	min 12 %
Reducción de área, Z	min 50 %
Resistencia al impacto, KU	aprox. 25 J
Dureza	275 - 320 HB

Nota: Estas propiedades mecánicas se dan hasta ϕ 100 mm. Medidas mayores, favor consultar.

Tratamiento térmico

Recocidoblando

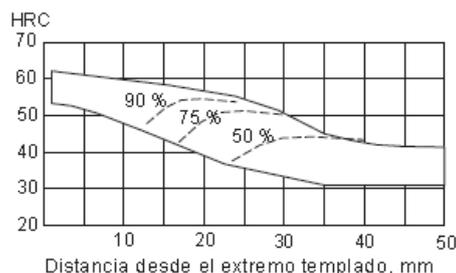
(680 - 720 °C): Mantener a la temperatura por 2 horas. Enfriar en el horno con una velocidad de 15 °C/h hasta los 600 °C y luego libremente al aire.

Alivio de tensiones

(450 - 650 °C): El acero templado tenaz deberá ser calentado hasta aproximadamente 50 °C por debajo de la temperatura usada para el revenido (como standard el 709 es suministrado revenido a 600 °C). Mantenerlo a esta temperatura durante 1/2 a 2 horas. Enfriar en el horno hasta los 450 °C y luego libremente al aire.

Temple

(830 - 850 °C), Con enfriamiento en aceite: El tiempo de mantenimiento en minutos cuando ha alcanzado la temperatura de temple es 0.7 x espesor o diámetro en milímetros. Interrumpir el enfriamiento a los 125 °C y luego revenir inmediatamente.



Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

ACERO INOXIDABLE AUSTENITICO																						
A 18A (SIMILAR AISI TIPO 303)																						
ANÁLISIS QUÍMICO TÍPICO	Carbono	0.15 máx.	Silicio	1.00 máx.																		
	Manganeso	2.00 máx.	Cromo	17.00 / 19.00																		
	Fósforo	0.20 máx.	Níquel	8.00 / 10.00																		
	Azufre	0.15 min.																				
DESCRIPCIÓN	Acero inoxidable austenítico, no magnético (no lo atrae el imán), de alta maquinabilidad la cual puede ser mejorada por deformación en frío teniendo en cuenta que esta deformación no sea excesiva, ya que si se crean grandes tensiones internas pueden aparecer grietas. Su estructura es austenítica a todas las temperaturas.		Por la adición de azufre se mejora la maquinabilidad pero se disminuye la soldabilidad. La sensibilidad a la precipitación de carburos durante la soldadura hace que su empleo quede limitado a aquellas piezas que posteriormente pueden recibir un temple austenítico (hipertemple)																			
APLICACIONES	Deberá ser considerado para la fabricación de flechas, cuerpos de válvula, válvulas y accesorios. Este acero no produce gran fricción lo cual permite que el desensamble de partes sea fácil		Evitando con esto dañar las piezas.																			
TRATAMIENTO TÉRMICO	Recocido: Calentar a 1010 / 1066 °C (1850 / 1950 °F), y enfriar en agua, obteniéndose con este tratamiento una dureza aproximada de 160 HBN		Endurecido: No puede ser endurecido por tratamiento térmico, sin embargo por deformación en frío aumenta su resistencia y dureza.																			
PROPIEDADES FÍSICAS	PROPIEDADES MECÁNICAS TÍPICAS A TEMPERATURA AMBIENTE																					
Densidad	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr style="background-color: red; color: white;"> <th colspan="2">Resistencia a la Tensión</th> <th colspan="2">Límite de Cedencia</th> <th rowspan="2">Elongación (%)</th> <th rowspan="2">Reducción de área (%)</th> <th rowspan="2">Dureza Brinell</th> </tr> <tr style="background-color: red; color: white;"> <th>ksi</th> <th>MPa</th> <th>ksi</th> <th>MPa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>90</td> <td>621</td> <td>35</td> <td>241</td> <td>50</td> <td>55</td> <td>160</td> </tr> </tbody> </table>				Resistencia a la Tensión		Límite de Cedencia		Elongación (%)	Reducción de área (%)	Dureza Brinell	ksi	MPa	ksi	MPa	90	621	35	241	50	55	160
Resistencia a la Tensión					Límite de Cedencia		Elongación (%)	Reducción de área (%)				Dureza Brinell										
ksi					MPa	ksi			MPa													
90					621	35	241	50	55	160												
Calor específico																						
32 / 212 °F																						
0 / 100 °C																						
Resistividad eléctrica																						
ohm-cir-mil/ft																						
microhm-mm																						
Coeficiente de expansión térmica																						
32 / 1200 °F																						
0 / 649 °C																						

Selección de un material considerando la metodología de evaluación de ciclo de vida (LCA) y aplicando métodos multicriterios (MCDM).

1	2	3	4	5	6	7	8
AISI núm.	Tratamiento	Temperatura °C (°F)	Resistencia a la tensión MPa (kpsi)	Resistencia a la fluencia, MPa (kpsi)	Elongación, %	Reducción en el área, %	Dureza Brinell
1030	TyR*	205 (400)	848 (123)	648 (94)	17	47	495
	TyR*	315 (600)	800 (116)	621 (90)	19	53	401
	TyR*	425 (800)	731 (106)	579 (84)	23	60	302
	TyR*	540 (1 000)	669 (97)	517 (75)	28	65	255
	TyR*	650 (1 200)	586 (85)	441 (64)	32	70	207
	Normalizado	925 (1 700)	521 (75)	345 (50)	32	61	149
	Recocido	870 (1 600)	430 (62)	317 (46)	35	64	137
1040	TyR	205 (400)	779 (113)	593 (86)	19	48	262
	TyR	425 (800)	758 (110)	552 (80)	21	54	241
	TyR	650 (1 200)	634 (92)	434 (63)	29	65	192
	Normalizado	900 (1 650)	590 (86)	374 (54)	28	55	170
	Recocido	790 (1 450)	519 (75)	353 (51)	30	57	149
1050	TyR*	205 (400)	1 120 (163)	807 (117)	9	27	514
	TyR*	425 (800)	1 090 (158)	793 (115)	13	36	444
	TyR*	650 (1 200)	717 (104)	538 (78)	28	65	235
	Normalizado	900 (1 650)	748 (108)	427 (62)	20	39	217
	Recocido	790 (1 450)	636 (92)	365 (53)	24	40	187
1060	TyR	425 (800)	1 080 (156)	765 (111)	14	41	311
	TyR	540 (1 000)	965 (140)	669 (97)	17	45	277
	TyR	650 (1 200)	800 (116)	524 (76)	23	54	229
	Normalizado	900 (1 650)	776 (112)	421 (61)	18	37	229
	Recocido	790 (1 450)	626 (91)	372 (54)	22	38	179